Quantification des bénéfices des revêtements perméables. Modélisation à l'échelle de la structure et du bassin versant

Olivier Cortier

▶ **To cite this version:**

Olivier Cortier. Quantification des bénéfices des revêtements perméables. Modélisation à l'échelle de la structure et du bassin versant. Génie civil. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMC247 . tel-02064298

HAL Id: tel-02064298
https://theses.hal.science/tel-02064298

Submitted on 11 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité GENIE CIVIL

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

Quantification des bénéfices des revêtements perméables. Modélisation à l'échelle de la structure et du bassin versant

Présentée et soutenue par
Olivier CORTIER

Thèse soutenue publiquement le 19/11/2018 devant le jury composé de		
M. JEAN-LUC BERTRAND-KRAJEWSKI	Professeur des universités, INSA Lyon	Rapporteur du jury
Mme MARIE-CHRISTINE GROMAIRE	Directeur de recherche, ECOLE NATIONALE PONTS ET CHAUS	Rapporteur du jury
M. EMMANUEL BERTHIER	Chargé de recherche, CEREMA	Membre du jury
M. MOHAMED BOUTOUIL	Directeur de recherche, Ecole sup.d'ingénieurs ESITC Caen	Directeur de thèse
M. OLIVIER MAQUAIRE	Professeur des universités, UNIVERSITE CAEN NORMANDIE	Co-directeur de thèse

Thèse dirigée par MOHAMED BOUTOUIL et OLIVIER MAQUAIRE, Littoral, environnement, télé-détection, géomatique (Caen)

UNIVERSITÉ CAEN NORMANDIE

ED 591 PSIME

U.M.R. 6554 CNRS LETG

REMERCIEMENTS

Une thèse est une belle aventure qui, à bien y penser, comporte quelques similitudes avec le tour de France à vélo. Comme le coureur cycliste, le thésard passe par des sommets et des creux lors des nombreuses étapes de son périple, qui ne dure pas trois semaines mais trois ans ! Surtout, comme le vélo qui est un sport individuel mais se gagne en équipe, si j'arrive aujourd'hui jusqu'à la ligne d'arrivée de ma thèse ce n'est pas tout seul mais bien grâce à tous ceux qui m'ont accompagné et encouragé ces trois dernières années.

Dans le rôle des directeurs sportifs, un immense merci à mes directeur et codirecteur de thèse Monsieur Mohamed BOUTOUIL, et Monsieur Olivier MAQUAIRE. Vos précieux conseils, toujours donnés au bon moment dans l'oreillette, m'ont guidé du début à la fin de cette thèse. Au cours de nos nombreuses discussions vous avez toujours su m'encourager quand je ralentissais dans les montées, me raisonner quand je partais trop vite en descente et me ramener à l'essentiel lors de mes sorties de route. J'ai vraiment apprécié votre disponibilité et la qualité de relation et de dialogue que nous avons eues ensemble.

Dans le rôle du jury de course, je remercie Madame Marie-Christine GROMAIRE et Monsieur Jean-Luc BERTRAND-KRAJEWSKI de me faire l'honneur d'avoir accepté d'être rapporteurs pour mon travail de thèse, ainsi que Monsieur Emmanuel BERTHIER pour votre présence comme examinateur dans mon jury de thèse. En plus de votre présence comme jury au moment du passage de la ligne d'arrivée, je tiens à vous remercier tout particulièrement pour les échanges que nous avons pu avoir à l'occasion de conférences ou de rencontres de travail. Votre regard bienveillant et intéressé sur mon travail a été une source de motivation et d'encouragement.

J'ai eu la chance d'appartenir à deux équipes de recherche et je tiens à remercier tous ceux qui ont été mes coéquipiers à l'ESITC et au LETG ces trois dernières années :

- Un merci tout particulier pour Mad ! Compagnons d'échappées depuis le premier jour nous aurons traversé ensemble toutes les étapes de notre vie de doctorant, jusqu'à la soutenance. Que de souvenirs après trois ans dans le même bureau ! Mille mercis pour ton soutien, ton écoute et ton humour ! Je compte bien te revoir souvent et aller regarder le tour de France avec toi !
- Merci aux (ex)doctorants : Arthur, Axel, Fanny, François, Guillaume, Jonathan, Kévin, Huyen, Sahar, Sylvain, Thibault, Thomas, Tuan Anh, et Vincent. Ça a été un plaisir de partager les bons moments de la vie du peloton avec vous, et vous avez toujours été là quand il a fallu se serrer les coudes pour finir dans les délais !
- Merci aux enseignants-chercheurs et post-doc : Antoine, Amel, Aurélie, Candide, Daniel, Fouzia, Hector, Jean-Jacques, Jean-Michel, Karim, Mariane, Malo, Nassim, Samuel, Stéphane et Valentin. À l'image des « baroudeurs » du peloton, vous avez toujours été là pour me partager votre expérience. Je remercie en particulier Dang pour l'accompagnement que tu m'as accordé lors de ma première année de thèse, Olivier CANTAT pour ta disponibilité et ton aide précieuse dans ma découverte du monde passionnant de la climatologie et Romain pour ton soutien dans la prise en main de Netlogo.

- Merci aux ingénieurs et techniciens : Blandine, David, Marie-Paule et Mohand. J'ai vraiment apprécié votre aide, de la préparation des essais à la relecture de la thèse. Un merci spécial pour Fred, nos échanges et ton investissement ont largement participé à l'avancement de cette thèse. Merci, Guillaume, pour ton aide précieuse sur l'importance de la prise en compte des forces d'inertie et la compréhension de la loi de FORCHHEIMER.

Au cours de ces trois années de nombreuses personnes m'ont « passé des relais ». Je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui, par leurs informations, leurs travaux et leur investissement m'ont fait profiter de superbes aspirations pour avancer plus vite et plus loin.

- Je remercie tout spécialement Monsieur Bruno HITIER, 1er adjoint en charge de l'urbanisme, l'aménagement, l'accessibilité, le cadre de vie et le développement durable à la mairie de Ouistreham. Un très grand merci pour le temps que vous m'avez accordé et les précieuses informations que vous m'avez fournies. Votre enthousiasme a été pour moi une motivation supplémentaire !
- Merci à tous les élèves que j'ai eu la chance d'encadrer en projet d'initiation à la recherche à l'ESITC : Simon DELIGNY, Geoffrey PAIN, Thomas VALLÉE, Gauthier DACQUIN, Bertrand FLIPPE, Raphaël MORANTIN, Lauriane PLANQUE, Pauline PUJA, Sylvain FROC, Issa ASSCOFARE, Manuel TORRIBIO FERNANDEZ, Mélinda MENOU, Bastian DIREUR, Maxime GRASDEPOT, Thibault O'JEANSON et Pierre SCLAVON. Vous avez souvent essuyé les plâtres de mes modèles et vos réflexions ont été de précieuses sources d'enrichissement pour mon travail.
- Je remercie sincèrement Carole NTSAME NDO, Ewen BOUGET, Mathieu DUBOIS et Nicolas CHAVANE pour votre sérieux et votre investissement dans le cadre de votre projet de recherche de fin d'étude à l'ESITC. Les résultats que vous avez produits lors de vos essais m'ont été très précieux pour la vérification du modèle *PermetAble*.
- Un très grand merci à Thibaut CARDINAL, Anaïs LE DAIN et Augustin SALLENT, du master AGIRE de l'université de Caen. Votre travail de description du quartier *Riva Bella* a largement contribué à l'avancement de ma thèse. Je vous remercie sincèrement pour votre implication tout au long de votre projet, et même après !
- Je remercie Chloé MAGNIER dont j'ai eu plaisir à encadrer le travail de TIPE. Votre implication remarquable dans votre travail sur le colmatage des pavés drainants m'a permis d'explorer un peu plus cet enjeu si important pour les revêtements perméables.

Le maillot à pois du meilleur grimpeur revient à Virginie KLAUSER du DÔME. Grâce à tes formations et ton soutien j'ai pu découvrir les joies de la médiation scientifique dans les collèges et lycées normands. Même si mon ascension des marches du concours *« Ma thèse en 180 secondes »*s'est arrêtée vite, je te dois beaucoup dans mon beau début de parcours.

Je tiens à remercier tout particulièrement ma maman. Tu remportes haut la main le maillot vert de meilleur sprinteur pour ton travail de relecture de ma thèse, souvent dans un temps record ! Un très grand merci à ma famille et belle famille pour votre soutien moral et même culinaire (*#cuisinetathese*) tout au long de ces trois années.

Les mercis du cœur vont à Marie et Augustin. Marie, je t'accorde sans hésiter le dossard rouge de la combativité pour ton soutien moral et surtout ton humour qui m'ont porté pendant ces trois années. Augustin, du haut de tes 11 mois le jour de la soutenance tu remportes haut la main le

maillot blanc du meilleur jeune ! Merci pour tes sourires, ils sont ma plus belle récompense quand je rentre d'une journée de rédaction. Vous avez tous les deux illuminé ces trois dernières années. J'ai vécu, grâce à vous, mes plus beaux engagements, et pour citer mon co-directeur de thèse, *« ça c'est la vraie vie ! ».*

Je remercie également tous ceux qui, comme les supporteurs sur le bord de la route, m'ont encouragé lors de chaque étape. Amis, famille, collègues un grand merci pour votre soutien !

Dans le rôle du sponsor, un très grand merci à la Région Normandie qui a financé cette thèse. J'espère que mon travail a été à la hauteur de l'engagement de la Région et qu'il contribuera à encourager la diffusion des techniques alternatives dans les villes normandes.

Enfin, je remercie l'ESITC Caen, et en particulier Monsieur Jérôme LEBRUN, de m'avoir accueilli au sein de cette équipe. Je suis reconnaissant de la confiance qui m'a été accordée et je serai heureux de continuer à porter le maillot de l'ESITC pour les prochaines saisons !

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements ii
Table des matières v
Notations 1
Introduction générale 3
Contexte général de la thèse 3
Objectifs de la thèse 3
Quantifier le comportement et les bénéfices des revêtements perméables 3
Des objectifs déclinés en deux étapes 4
Organisation du manuscrit 4
Chapitre 1 – Contexte du travail et état de l'art 5
Chapitre 2 – Données au service de la modélisation 5
Chapitre 3 – Modélisation physique à l'échelle de la structure 6
Chapitre 4 – Modélisation multi-agent à l'échelle du bassin versant 6
1 Contexte du travail et état de l'art 7
1.1 Le cycle de l'eau et les sols en milieu urbain 8
1.1.1 Contexte historique de l'assainissement pluvial en France 8
1.1.2 Les conséquences du contexte actuel sur l'hydrologie urbaine 11
1.1.3 Défis et opportunités des villes actuelles 16
1.2 Les structures à revêtements perméables 24
1.2.1 Définition des structures à revêtements perméables 24
1.2.2 État des connaissances sur les structures à revêtements perméables 28
1.2.3 Enjeux de recherche concernant les structures à revêtements perméables 32
1.3 Modélisation numérique des revêtements perméables 35
1.3.1 La modélisation numérique en hydrologie urbaine 35
1.3.2 Les enjeux de la modélisation des revêtements perméables 38
1.3.3 Une problématique déclinée en deux étapes 42
1.3.4 Un ancrage contextuel et régional 46
Conclusion du chapitre 49
Principes de recherche 49
Synthèse du chapitre 1 51
2 Données au service de la modélisation 53
2.1 Propriétés des matériaux et de la structure 55
2.1.1 Propriétés des matériaux 55
2.1.2 Description des courbes de rétention d'eau des matériaux utilisés 63

2.1.3 Description de la structure retenue et de son environnement ... 68
2.2 Expériences quantitatives sur banc d'essai en laboratoire ... 73
2.2.1 Présentation du banc d'essai ... 73
2.2.2 Présentation des essais réalisés ... 76
2.2.3 Analyse des résultats expérimentaux ... 79
2.3 *Riva Bella*, site d'application du modèle *PorousCity* ... 84
2.3.1 La commune de Ouistreham et son quartier de *Riva Bella* ... 84
2.3.2 Données utilisées dans le modèle *PorousCity* ... 93
2.4 Caractérisation des conditions climatiques locales ... 109
2.4.1 Présentation générale du climat de l'ex Basse-Normandie ... 109
2.4.2 Caractérisation de la pluviométrie ... 113
Conclusion du chapitre ... 127
3 Modélisation à l'échelle de la structure ... 129
3.1 Présentation et construction du modèle PermeAble ... 131
3.1.1 Modélisation par la méthode des éléments finis avec FlexPDE ... 131
3.1.2 Paramètres, hypothèses et conditions aux limites ... 138
3.1.3 Sorties du modèle et indicateurs ... 149
3.2 Calage et vérification du modèle *PermetAble* ... 159
3.2.1 Calage « expérimental » du modèle ... 159
3.2.2 Vérification « expérimentale » du modèle ... 166
3.3 Exploration du modèle *PermetAble* ... 173
3.3.1 Analyse de sensibilité ... 173
3.3.2 Quantification des performances des structures perméables ... 190
3.4 Synthèse du chapitre 3 et discussion ... 210
3.4.1 Synthèse des résultats principaux ... 210
3.4.2 Discussion sur les limites du modèle *PermetAble* ... 217
4 Modélisation multi-agents à l'échelle du bassin versant ... 221
4.1 Présentation et construction du modèle *PorousCity* ... 223
4.1.1 La modélisation multi-agents avec Netlogo ... 223
4.1.2 Vue d'ensemble du modèle *PorousCity* ... 227
4.1.3 Les concepts de modélisation de *PorousCity* ... 233
4.1.4 Détails du modèle *PorousCity* ... 242
4.2 Calage et vérification du modèle *PorousCity* ... 253
4.2.1 Calage des variables de génération des agents *drops* et *waters* ... 253
4.2.2 Vérification de la modélisation des structures à revêtements perméables ... 258
4.2.3 Analyse de l'influence de la description du bassin versant ... 265
4.2.4 Vérification des résultats du modèle ... 275

4.3 Exploration du modèle *PorousCity* ... 282
4.3.1 Scénario de référence ... 282
4.3.2 Scénarios d'aménagement des trottoirs ... 285
4.3.3 Scénarios 'RP puits' ... 288
4.3.4 Scénarios 'RP bas et haut' ... 290
4.3.5 Influence du placement des revêtements perméables ... 292
4.3.6 Influence des propriétés des revêtements perméables ... 298
4.4 Synthèse du chapitre 4 et discussions ... 302
4.4.1 Synthèse des résultats principaux ... 302
4.4.2 Discussion sur la modélisation multi-agents ... 308
Conclusion générale et perspectives ... 311
Réflexion et perspectives sur la modélisation en hydrologie urbaine ... 311
Performances et optimisation des structures perméables ... 312
Bénéfices et implantation des structures perméables ... 313
Perspectives de recherche sur les revêtements perméables ... 314
Références ... 317
Glossaire ... 331
Liste des figures ... 333
Liste des tableaux ... 343
Liste des équations ... 347
Annexes ... 349
Annexe A. L'eau dans les milieux poreux ... 349
Caractérisation des milieux poreux, la phase solide ... 349
Les différents états et interactions de l'eau dans un milieu poreux ... 351
Les états de liaison de l'eau dans un milieu poreux ... 351
La circulation de l'eau dans les milieux poreux ... 357
Les interactions surface-atmosphère et l'évaporation ... 361
Annexe B. Le colmatage des pavés drainants ... 362
Le colmatage des pavés en béton drainant coquillé ... 362
Observation du colmatage in situ ... 364
Étude en laboratoire du colmatage par le sable éolien ... 365
Annexe C. Présentation des typologies pluviométriques retenues ... 368
Les évènements supérieurs à 25 mm ... 369
Les évènements inférieurs à 25 mm ... 372
Les séries d'évènements ... 375
Annexe D. Fiche climatologique de la station Météo France de Caen-Carpiquet ... 379

Annexe E. Code du modèle *PermetAble* 381
Annexe F. Code du model *PorousCity* 400
Résumé 422
Abstract 422

NOTATIONS

C_d [-] : coefficient d'orifice

C_u [-] : coefficient d'uniformité

C_Ψ [-] : coefficient du modèle de KOVACS modifié

C_r [-] : coefficient de ruissellement

d [L] : dimension moyenne de taille de pore

D_{10} [L] : diamètre efficace, diamètre passant à 10 % sur la courbe granulométrique cumulée ;

D_{60} [L] : diamètre passant à 60 % sur la courbe granulométrique cumulée ;

D_{eq} [L] : diamètre équivalent

D_h [L] : diamètre équivalent des pores pour les milieux hétérogènes

e [-] : indice des vides

F [-] : valeur du test de FICHER

g [L·T^{-2}] : constante gravitationnelle

h [L] : pression intersticielle exprimé en hauteur de colonne d'eau équivalente (mH_2O)

h_{drain} [L] : hauteur de positionnement du drain

h_j [L] : hauteur maximale de l'ascension capillaire

h_{co} [L] : remontée capillaire équivalente

h_r [L] : pression limite d'évaporation

H [L] : charge hydraulique

H_r [-] : humidité relative de l'air

K [L·T^{-1}] : coefficient de perméabilité

K_{eq} [L·T^{-1}] : coefficient de perméabilité équivalent

K_{min} [L·T^{-1}] : coefficient de perméabilité minimum

K_s [L·T^{-1}] : coefficient de perméabilité saturée

m [-] : coefficient de VAN GENUCHTEN

M [-] un paramètre de distribution des pores

n [-] : coefficient de VAN GENUCHTEN

$n_{fondation}$ [-] : porosité de la fondation

p [M·L^{-1}·T^{-2}] : pression interstitielle

p_{vs} [M·L^{-1}·T^{-2}] : pression de vapeur saturante

p_{ve} [M·L^{-1}·T^{-2}] : pression de vapeur existante

$\vec{q}$ [L·T^{-1}] : vitesse de filtration

Q [L^3·T^{-1}] : débit

Q_e [L^3·T^{-1}] : débit entrant

Q_{s_drain} [L^3·T^{-1}] : débit sortant par le drain

Q_{s_inf} [L^3·T^{-1}] : débit sortant par infiltration

Q_{s_evap} [L^3·T^{-1}] : débit sortant par évaporation

Q_i^{mod} [L^3·T^{-1}] : $i^{ème}$ valeur de débit modélisé

Q_i^{obs} [L^3·T^{-1}] : $i^{ème}$ valeur de débit mesuré

Q_{mean}^{obs} [L^3·T^{-1}] : valeur moyenne de débit modélisé

R^2 [-] : coefficient de détermination

Re [-] : nombre de REYNOLDS

S_a [-] : indice de saturation par l'adhésion

S_c [-] : indice de saturation capillaire

S_m [L^2·M^{-1}] : surface spécifique des grains

S_r [-] : indice de saturation

S_v [L^2] : surface spécifique des vides

t [T] : temps

$\vec{v}$ [L·T^{-1}] : vitesse réelle de du fluide dans les pores

V_v [L^3] : volume des vides

V_{stock} [L^3] : volume stocké

Z (ou Y dans FlexPDE) [L] coordonnée verticale ;

α [L^{-1}] : Coefficient de VAN GENUCHTEN

α_s [-] : facteur de forme

β [-] : angle de contact du liquide sur la surface

γ_w [M·L^{-2}·T^{-2}] : poids volumique de l'eau

θ [-] : teneur en eau

θ_c [-] : teneur en eau à rétention

θ_r [-] : teneur en eau résiduelle

θ_s [-] : teneur en eau à saturation

μ [M·L^{-1}·T^{-1}] : viscosité dynamique d'un fluide

ν [L^2·T^{-1}] : viscosité cinématique d'un fluide

ρ [M·L^{-3}] : masse volumique

σ [M·T^{-2}] : tension superficielle de l'eau

τ [-] : tortuosité d'un milieu granulaire

Φ_z [M·L^{-1}·T^{-2}] : potentiel de gravité

Φ_p [M·L^{-1}·T^{-2}] : potentiel de pression

Φ_o [M·L^{-1}·T^{-2}] : potentiel osmotique

Ψ [L] : succion matricielle

Ψ_0 [L] : succion correspondant à un milieu sec

Ψ_a [L] : point d'entrée de l'air

Ψ_n [L] : paramètre de normalisation

Ψ_r [L] : succion à la teneur en eau résiduelle

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA THÈSE

Il est désormais généralement admis que les activités humaines impactent le climat et entraînent une dégradation du bon état écologique de l'environnement (GIEC, 2014; La Jeunesse et Quevauviller, 2016). Dans ce contexte, la gestion de l'eau en général, et la gestion des eaux pluviales en particulier, représentent des enjeux majeurs pour l'aménagement des villes afin de limiter leurs impacts sur l'environnement, et de les rendre plus résilientes face aux événements climatiques extrêmes et à leurs conséquences (OECD, 2013, 2014; United Nations, 2014). Ainsi, depuis plusieurs années, la gestion des eaux pluviales en milieu urbain évolue vers une approche plus intégrée qui vise à favoriser les processus hydrologiques naturels, l'évaporation et l'infiltration notamment (Bertrand-Krajewski, 2006; Petrucci, 2012). Pour répondre à un tel objectif, les aménageurs ont à leur disposition une large palette d'ouvrages, réunis en France sous l'appellation de 'techniques alternatives', dont le mode de fonctionnement repose le plus souvent sur la rétention de l'eau et/ou son infiltration dès l'amont des bassins versants (CERTU, 2003; Chocat, 2009).

Ce travail de thèse porte en particulier sur les revêtements perméables qui constituent l'une de ces techniques. Il s'inscrit dans la continuité de la recherche effectuée par Dang NGUYEN au sein du laboratoire de l'ESITC, dans le cadre du projet collaboratif européen VECOP[1]. Ce projet avait comme objectif de valoriser les coproduits coquillers dans les matériaux de construction, et a conduit au développement de pavés en béton drainant incorporant des coquillages broyés en substitution d'une partie des granulats (Nguyen, 2014). Dans le prolongement de ces travaux, le projet collaboratif européen VECOPEXP[2] est en cours pour tester *in-situ* des structures à revêtements perméables en pavés coquillés drainants. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux de recherche de cette thèse de doctorat. Menée en parallèle de l'expérimentation *in-situ*, cette thèse vise à explorer les bénéfices des revêtements perméables par une approche de modélisation numérique. Ces deux approches se complètent et s'enrichissent l'une l'autre.

Ce sujet est financé par la Région Normandie et s'inscrit volontairement dans un contexte régional. Il a été conduit au sein du laboratoire de l'ESITC Caen, et en lien avec le laboratoire de géographie physique et environnement (UMR LETG-Caen) de l'université de Caen-Normandie, qui s'intéresse à la compréhension de divers processus hydrologiques et à leurs modélisations en milieu périurbain et rural.

OBJECTIFS DE LA THÈSE

QUANTIFIER LE COMPORTEMENT ET LES BÉNÉFICES DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

La quantification des bénéfices de ces ouvrages répond à des enjeux scientifiques, notamment au besoin de compréhension des processus hydrologiques de l'échelle des structures perméables à celle du bassin versant urbain (Fletcher et al., 2013; Salvadore et al., 2015) mais également à des

[1] VECOP : Valorisation dE COProduits coquilliers marins en ECO-Pavé drainant (2010-2014) (Boutouil et Nguyen, 2014)
[2] VECOPEXP : Valorisation dE COProduits coquilliers marins en ECO-Pavé drainant – EXPérimentation *in-situ* (en cours).

enjeux opérationnels, pour favoriser des usages adaptés des revêtements perméables sur le terrain. Ainsi différents objectifs ont été fixés pour cette thèse :

- décrire et quantifier l'influence des caractéristiques des structures à revêtements perméables et de leur environnement sur les processus hydrologiques en entrée, en sortie, et dans la structure ;
- décrire et quantifier les impacts de la mise en œuvre de structures à revêtements perméables sur le ruissellement de surface et le bilan hydrologique à l'échelle d'un bassin versant.

Ces objectifs portent seulement sur une approche quantitative des processus hydrologiques et écartent délibérément la prise en compte de la qualité de l'eau, ce qui sort du cadre de ce travail.

DES OBJECTIFS DÉCLINÉS EN DEUX ÉTAPES

Les objectifs de la thèse impliquent de considérer à la fois l'échelle des structures à revêtements perméables, afin de décrire les écoulements à l'intérieur de ces ouvrages, et l'échelle du bassin versant où sont implantées ces structures, pour étudier leurs impacts sur le bilan hydrologique et le ruissellement de surface. La prise en compte des spécificités propres à chacune de ces échelles constitue un enjeu de recherche important en hydrologie urbaine (Salvadore et al., 2015). Dans le cadre de ce travail, il a été choisi de considérer ces deux échelles de façon distincte et de développer deux modèles numériques, adaptés spécifiquement à chacune des échelles :

- la modélisation des processus hydrologiques à l'échelle d'une structure à revêtement perméable, avec une approche physique, codée dans le logiciel FlexPDE (modèle appelé par la suite *PermetAble*) ;
- la modélisation des processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant, avec une approche conceptuelle par système multi-agents, codée dans le logiciel Netlogo (modèle appelé par la suite *PorousCity*).

ORGANISATION DU MANUSCRIT

Ce manuscrit de thèse est organisé en quatre chapitres (Figure 0.1) présentant le développement, les données et les résultats de ce travail de recherche.

Les enjeux de la gestion des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant constituent le point de départ. Ces enjeux sont liés aux choix d'aménagement pris à l'échelle des ouvrages de gestion de l'eau (Chapitre 1). Les revêtements perméables sont une des solutions pour mettre en œuvre une gestion de l'eau à la source. Pour promouvoir leur usage, il convient d'apporter des éléments de compréhension et de quantification de leur fonctionnement hydrologique (échelle de la structure – Chapitre 3) et de leurs bénéfices sur les processus hydrologiques globaux (échelle du bassin versant – Chapitre 4). Le travail de quantification proposé s'appuie sur deux modélisations numériques, *PermetAble* (Chapitre 3) et *PorousCity* (Chapitre 4), qui nécessitent différentes données d'entrée (Chapitre 2).

Le contenu de chacun des chapitres est détaillé ci-après.

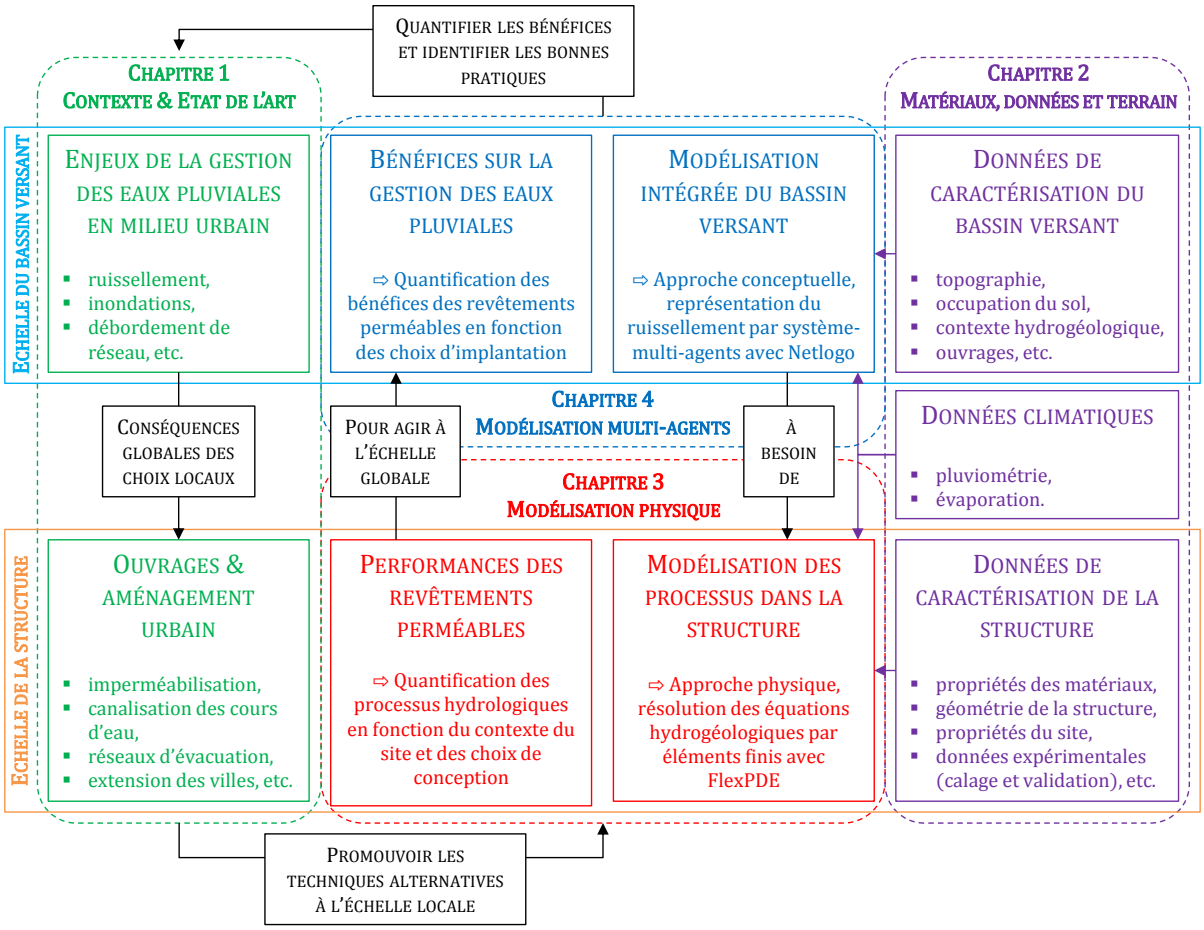


Figure 0.1 – Schématisation de la démarche du travail de thèse et des liens entre les deux échelles.

CHAPITRE 1 – CONTEXTE DU TRAVAIL ET ÉTAT DE L'ART

Le chapitre 1 est consacré à la mise en contexte de ce travail et à une étude bibliographique. La section 1.1 présente le contexte et les enjeux de la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Elle permet de situer le reste de ce travail dans son contexte élargi. La section 1.2 développe plus spécifiquement les connaissances scientifiques autour des revêtements perméables. Cette section met en évidence les avantages, les limites et les enjeux de recherche actuels. Enfin, la section 1.3 présente les enjeux de la modélisation en hydrologie urbaine et détaille les raisons conduisant au choix d'une double modélisation et à l'utilisation des logiciels FlexPDE et Netlogo. À la fin de ce chapitre, une synthèse met en perspective ces trois sections et présente les principes et partis pris qui guident ce travail de recherche.

CHAPITRE 2 – DONNÉES AU SERVICE DE LA MODÉLISATION

Le chapitre 2 présente les données nécessaires au développement des deux modèles. Il comprend quatre sections autonomes qui détaillent chacune un type de données :

- la section 2.1 détaille les données liées à la description des matériaux et de la géométrie des structures à revêtements perméables modélisées. Elle revient sur les choix effectués pour l'estimation de ces valeurs et présente en particulier la méthode utilisée pour la détermination de la courbe de rétention d'eau des matériaux de la structure. Les données de cette section sont utilisées dans les deux modèles ;

- la section 2.2 présente le dispositif de banc d'essai utilisé pour obtenir des valeurs expérimentales pour le calage et la vérification du modèle *PermetAble* (échelle de la structure) ;
- la section 2.3 est dédiée à la présentation du site d'application du modèle *PorousCity* (échelle du bassin versant). Elle présente le contexte du bassin versant retenu, le quartier de *Riva Bella* de la commune de Ouistreham (Calvados), puis détaille les données nécessaires à la représentation de ce bassin versant dans le modèle *PorousCity* (topographie, occupation du sol, etc.) ;
- la section 2.4 aborde la question des données pluviométriques utilisées en entrée des deux modélisations. Après une rapide présentation du contexte climatique normand, elle propose une démarche de classification des typologies de pluie à partir de l'étude des données pluviométriques historiques sur Caen. Cette classification est ensuite appliquée pour choisir les évènements historiques qui sont utilisés comme données d'entrée dans le reste de ce travail.

La synthèse de ce chapitre met en évidence les données présentant des spécificités ou des points d'attention à explorer lors de la modélisation.

CHAPITRE 3 – MODÉLISATION PHYSIQUE À L'ÉCHELLE DE LA STRUCTURE

Le chapitre 3 présente le développement (Section 3.1), le calage et la vérification (Section 3.2) et enfin l'exploitation du modèle *PermetAble* (Section 3.3). L'exploitation de ce modèle vise à apporter des éléments de réponse à la première partie de la problématique de ce travail ; étudier et quantifier le fonctionnement des structures à revêtements perméables. Cette quantification porte sur le fonctionnement des revêtements perméables à l'échelle de la structure (quelques places de parking perméables par exemple). Concrètement, il s'agit d'étudier, à l'aide du modèle *PermetAble*, la circulation de l'eau depuis son entrée dans la structure jusqu'à sa sortie et de quantifier l'influence des paramètres de la structure ou de son environnement sur cette circulation. L'exploration du modèle *PermetAble* vise également à fournir les éléments nécessaires à la modélisation des structures à revêtements perméables à échelle du bassin versant. À la fin de ce chapitre (Section 3.4), une représentation conceptuelle des revêtements perméables est proposée et argumentée. Elle constitue la base de la représentation des structures à revêtements perméables dans le modèle *PorousCity*.

CHAPITRE 4 – MODÉLISATION MULTI-AGENT À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Le chapitre 4 suit la même organisation que le chapitre 3. Il présente le développement (Section 4.1), le calage et la vérification (Section 4.2) et enfin l'exploitation du modèle *PorousCity* (Section 4.3). Ce quatrième chapitre vise à quantifier les bénéfices potentiels des revêtements perméables sur un bassin versant, notamment en fonction de leur implantation. Concrètement, il s'agit d'évaluer l'effet de la superficie, de la localisation, et des propriétés des revêtements perméables implantés, sur les volumes ruisselés et le bilan hydrologique du quartier de *Riva Bella*, choisi comme site d'application du modèle. Les bénéfices potentiels de ces structures sont synthétisés à la fin de ce chapitre (Section 4.4) avant de discuter de la pertinence d'une telle modélisation en hydrologie urbaine.

CHAPITRE 1

1 CONTEXTE DU TRAVAIL ET ÉTAT DE L'ART

INTRODUCTION DU CHAPITRE

Les structures à revêtements perméables s'inscrivent dans le champ de l'hydrologie urbaine comme une des solutions pour une gestion alternative de l'assainissement pluvial. Techniques dites « alternatives » par rapport à l'approche historique qui consistait et consiste encore à capter les eaux pluviales *via* un réseau de canalisations pour les évacuer à l'extérieur des villes.

La première section commence par un retour historique sur le contexte de l'assainissement pluvial en France afin d'identifier les différents choix qui ont conduit au patrimoine actuel. Cet état des lieux permet de présenter et d'expliquer les limites et les conséquences de l'approche dite « classique » ou encore « tout tuyau » et ainsi de mieux apprécier l'importance des solutions alternatives, très largement étudiées dans la littérature. Ces techniques alternatives proposent une gestion à la source des eaux pluviales et plus largement un changement dans la façon de penser et de faire la ville. Les villes font en effet face à de nombreux défis dont une grande partie est liée, plus ou moins directement, à l'hydrologie urbaine. Deux d'entre eux, la maîtrise du risque d'inondation et les mutations de l'occupation du territoire, sont approfondis à la fin de la première section.

La deuxième section définit les structures à revêtements perméables, leurs compositions et leurs usages. Ces structures offrent de nombreux bénéfices qui sont largement étudiés dans la littérature. L'usage des structures à revêtements perméables présente également des limites voire des risques ; le colmatage, le gel/dégel, la contamination des sols. Certains de ces risques peuvent être limités voire annulés par des bonnes pratiques d'usage et de conception de ces structures. Après avoir présenté cet état des lieux des connaissances, cette seconde section détaille certains enjeux de recherche concernant les revêtements perméables pour situer ce travail dans l'environnement actuel de la recherche.

Ce travail de recherche est entièrement basé sur une démarche de modélisation des revêtements perméables. La troisième section pose les bases théoriques et méthodologiques nécessaires à ce travail de modélisation, avant de s'intéresser aux enjeux des recherches actuelles concernant les modèles en hydrologie urbaine. Les objectifs de la thèse et certains enjeux de modélisation ont conduit au choix du développement de deux modèles, à des échelles différentes, pour étudier d'une part les processus hydrologiques à l'échelle des structures perméables et d'autre part leurs bénéfices sur le ruissellement urbain, à l'échelle du bassin versant. Ce choix de modélisation est présenté et expliqué dans cette section en s'appuyant sur l'ensemble de ce chapitre. Enfin, cette modélisation nécessite des données d'entrée et un terrain d'étude, leur choix est présenté à la fin de cette section.

Enfin, la conclusion de ce chapitre développe les choix et les hypothèses pris dans le cadre de ce travail de recherche. Elle dresse une synthèse des enjeux principaux développés tout au long de ce chapitre.

1.1 LE CYCLE DE L'EAU ET LES SOLS EN MILIEU URBAIN

1.1.1 CONTEXTE HISTORIQUE DE L'ASSAINISSEMENT PLUVIAL EN FRANCE

L'eau et la ville sont liées par une histoire très ancienne qu'il est important de rappeler. En effet, le contexte actuel de la gestion des eaux pluviales est fortement lié au patrimoine historique dont les villes héritent. Cette sous-section revient sur l'évolution de la place de l'eau en milieu urbain, notamment en France. La Figure 1.1 présente une synthèse de cette section.

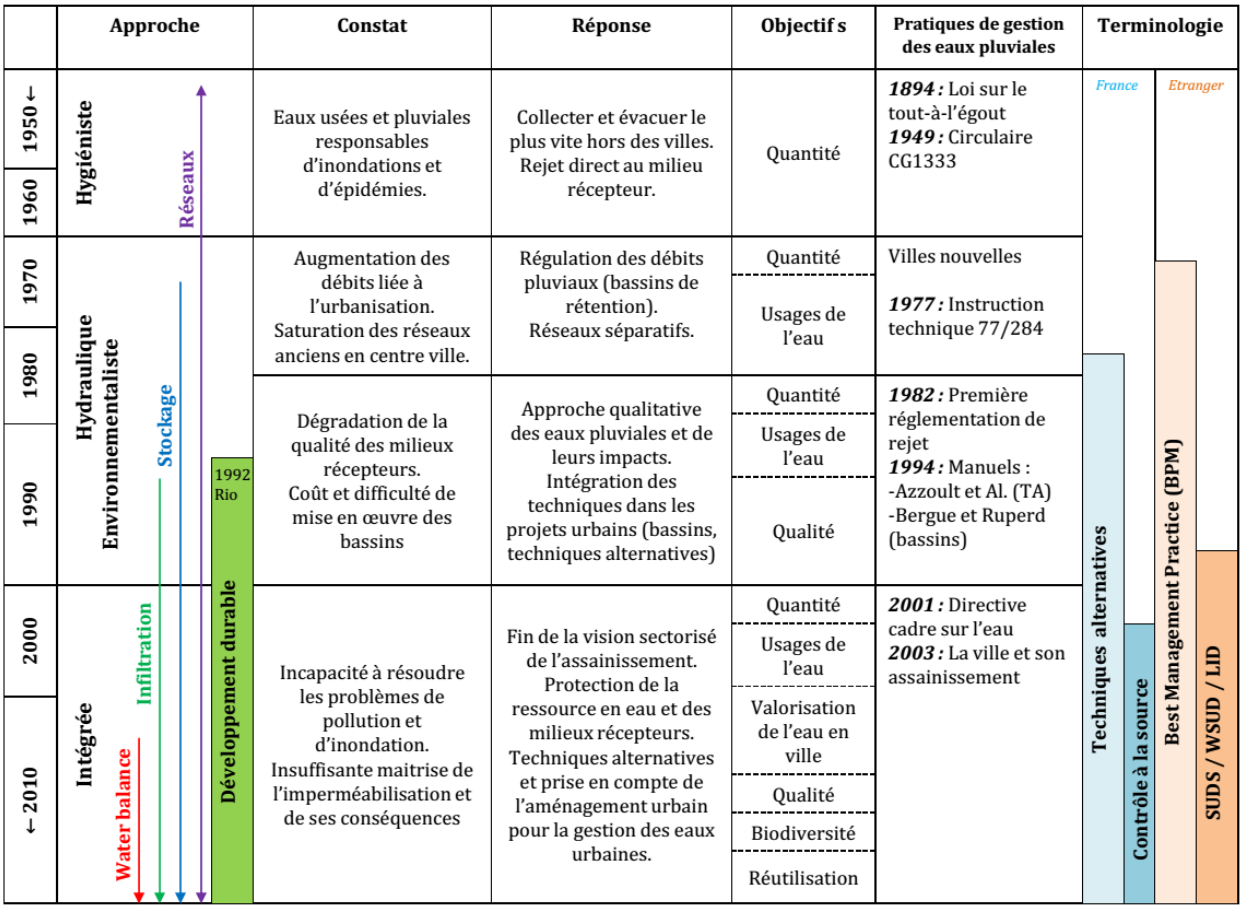


Figure 1.1 - Schéma de synthèse chronologique de l'évolution de la gestion des eaux pluviales dans l'assainissement urbain. Source principales d'information (CERTU, 2001; Petrucci, 2012).

1.1.1.1 IMPORTANCE DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE NATUREL

Pour toute société humaine l'accès à l'eau est un enjeu incontournable, aussi, c'est logiquement que de nombreuses villes se sont établies à proximité d'un cours d'eau. Le réseau hydrographique naturel est porteur de nombreuses ressources, mais peut également devenir un risque en cas de crue par exemple. Du fait de cette proximité immédiate entre les villes et l'eau, la protection contre les inondations est apparue très rapidement comme un enjeu essentiel pour les sociétés.

L'importance de la configuration hydrographique naturelle se retrouve également dans la mise en place des réseaux d'assainissement urbain. En France, au XVIème siècle certains ruisseaux urbains commencent à être régularisés, dallés, couverts et ainsi progressivement transformés en égouts. Sur ce principe, les réseaux d'assainissement primaires trouvent souvent comme origine un ruisseau. Cette logique conduit à enterrer l'eau et à oublier sa présence jusqu'à ce qu'un débordement ramène l'eau à la surface (Bertrand-Krajewski, 2006).

1.1.1.2 XIXÈME SIÈCLE, APPROCHE HYGIÉNISTE ET DÉBUT DE L'ASSAINISSEMENT PAR RÉSEAU

À partir des années 1850, la logique d'un réseau d'assainissement s'impose en France portée par le mouvement hygiéniste. À la suite des deux grandes épidémies de choléra de 1832 et 1848 les principes fondateurs du réseau d'assainissement moderne sont posés autour de l'idée de circulation incessante de l'eau et des déchets qui doivent être évacués le plus vite possible et surtout ne pas stagner (Bertrand-Krajewski, 2006). Cette approche voit l'eau comme un désordre à évacuer (Région Rhône Alpes, 2006; Zhou, 2014).

En France, la mise en œuvre technique de ces réseaux est assurée par les ingénieurs du corps des Ponts et Chaussés, pour la ville de Paris. Jules DUPUIS propose en 1830 de retenir une précipitation de 41 mm en une heure pour le dimensionnement des égouts (Bertrand-Krajewski, 2006). Ce choix sera confirmé par Eugène BELGRAND et ne tarde pas à devenir une quasi-norme sur l'ensemble du territoire français (Petrucci, 2012). L'assainissement a alors pour principes : pas d'infiltration, pas de stockage, seulement une évacuation la plus rapide possible. L'eau de pluie, considérée comme propre, se retrouve mélangée avec les eaux usées pour les diluer. En parallèle, le XIXème siècle marque aussi l'arrivée en France du bitume, inventé en Écosse entre 1820 et 1830 et rapporté en France par Henri NAVIER. Le goudronnage des rues commencera réellement au début du XXème siècle (Bertrand-Krajewski, 2006) entraînant une imperméabilisation rapide des villes.

1.1.1.3 LE XXÈME SIÈCLE, L'APPROCHE HYDRAULIQUE ET LES PREMIÈRE LIMITES

Ce système d'assainissement va être performant jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale. L'exode rural ainsi que l'augmentation de la consommation en eau provoquent une multiplication des rejets d'eaux usées entraînant la détérioration importante de la qualité des milieux récepteurs (Bertrand-Krajewski, 2006). Ces premiers problèmes ne remettent pas en cause la logique du tout-à-l'égout qui se voit confirmée dans la circulaire CG1333, dite circulaire CAQUOT, publiée en 1949 (Petrucci, 2012). Comme la précédente, cette circulaire est très souvent appliquée comme une norme sans tenir compte des spécificités locales et généralise l'utilisation de la période de retour décennale pour le dimensionnement des eaux pluviales. Aujourd'hui, l'empreinte de la pluie décennale est encore très forte dans le patrimoine dont les villes ont hérité (Petrucci, 2012).

Cette circulaire met en avant la méthode rationnelle et la notion de temps de concentration. Tout en réaffirmant la suprématie de la solution réseau, elle promeut également le système séparatif avec le traitement des eaux usées dans les stations d'épuration et le rejet direct des eaux pluviales dans les milieux récepteurs (Bertrand-Krajewski, 2006). Elle a représenté « la bible de l'assainissement » (Petrucci, 2012) jusqu'aux années 1970, facilitant par sa simplicité la reconstruction rapide de l'après-guerre. Le système séparatif qui a suscité un espoir important dans un premier temps ne confirme pas ses intérêts théoriques dans la pratique. L'objectif de diminution des coûts n'est pas atteint avec au contraire un surcoût important dû à la création

d'un double réseau. La réduction des impacts sur le milieu récepteur s'avère limitée, d'une part du fait que les eaux pluviales ne sont pas propres comme le supposait ce système, et d'autre part, en raison de la multiplication des mauvais branchements (Barraud et al., 2010).

Dans les années 1960-1970 la généralisation de l'automobile permet l'évolution de l'urbanisation avec le développement de l'habitat individuel et des premières grandes zones commerciales, c'est le début de la périurbanisation et de la construction des villes nouvelles en région parisienne. Cette urbanisation conduit à une imperméabilisation considérable ainsi qu'à une extension importante, et coûteuse, des réseaux existants. La topographie et la structure en étoile des réseaux conduisent à concentrer les eaux pluviales collectées vers les centres des agglomérations entraînant des débordements plus fréquents (Bertrand-Krajewski, 2006). Par ailleurs le surdimensionnement des réseaux dû à la méthode CAQUOT entraîne un acheminement très rapide des écoulements aggravant les débits de pointe (Petrucci, 2012).

Les dysfonctionnements conduisent à une première remise en question des réseaux d'assainissement avec une approche dite hydraulique qui préconise de ralentir les écoulements afin de réduire les débits de pointe de ruissellement. Les débordements des réseaux devenant de plus en plus fréquents, un changement de paradigme est préconisé avec la publication de l'instruction technique INT 77/284, qui incite à l'utilisation des bassins de retenue comme une alternative au réseau pour stocker voire infiltrer les eaux pluviales (Bertrand-Krajewski, 2006). Ce concept hydraulique, en opposition avec la précédente approche hygiéniste qui prônait une évacuation la plus rapide possible, montre sa pertinence dans les villes nouvelles de la région parisienne pour résoudre le problème d'absence d'exutoire naturel, et dans plusieurs villes qui connaissaient alors des débordements fréquents des réseaux : Bordeaux, Saint-Denis, Lyon (Petrucci, 2012). Malgré cela, cette approche peine à s'imposer et s'avère insuffisante pour résoudre les problèmes posés par la gestion urbaine de l'eau (Bertrand-Krajewski, 2006).

1.1.1.4 FIN XXÈME - DÉBUT XXIÈME SIÈCLE, L'APPROCHE ENVIRONNEMENTALISTE PUIS INTÉGRÉE, VERS UNE GESTION DÉCENTRALISÉE

À la fin du XXème siècle, les villes se font rattraper par la vitesse de l'urbanisation et ne pouvant supporter le coût de la construction de bassins, elles en imposent la réalisation par les aménageurs. Cette réglementation, mise en place pour la première fois dans la communauté urbaine de Bordeaux en 1982, entraîne la diffusion des techniques de stockage. Les eaux pluviales passent d'une gestion à l'échelle du bassin versant à celle du projet urbain (parcelle, ZAC) marquant le début des techniques alternatives (Petrucci, 2012).

Les problèmes de la gestion des eaux urbaines sont mis en exergue par l'inondation de Nîmes en octobre 1988 et celle de Narbonne en août 1989, ainsi que par les pics de pollution de la Seine en juillet 1990 et juin 1991. Ces quatre évènements sont révélateurs des limites de l'approche purement technicienne de l'assainissement et marquent fortement les esprits (Région Rhône Alpes, 2006).

Ces inondations et pics de pollution montrent qu'une approche sectorielle de l'assainissement est devenue insuffisante. L'importance d'une prise en compte globale de l'assainissement et de l'urbanisme émerge, avec pour objectif de gérer conjointement les enjeux de protection sanitaire, de protection contre les inondations et de protection de l'environnement (Bertrand-Krajewski, 2006). En Europe, la directive cadre « Eaux Résiduaires Urbaines » de 1991 vient marquer un tournant en imposant le traitement des eaux polluées même en période de pluie

(Chocat, 2009). Elle s'inscrit dans la logique environnementale qui domine alors dans l'approche de l'assainissement et va contribuer à la promotion des techniques alternatives.

En parallèle de l'évolution de l'assainissement, il faut noter l'importance du rapport BRUNDTLAND en 1987 et des conférences internationales sur le climat (notamment celle de Rio en 1992) qui entraînent l'émergence de la notion de développement durable. Cette notion est progressivement appliquée à la gestion de l'eau en ville en réinterrogeant son statut de déchet et en favorisant la diffusion des techniques alternatives qui sont rapidement considérées comme durables (Petrucci, 2012).

Enfin, il convient de souligner l'importance des lois de décentralisation, dès la loi de 1982, dans l'évolution de l'assainissement urbain. L'ouvrage, *La ville et son assainissement*, (CERTU, 2003) rappelle dès l'introduction que la circulaire de 1977 est caduque du seul fait des lois de décentralisation de 1982. Ce document se présente comme un référentiel technique non contraignant et n'a pas la portée de norme quasi-nationale qu'a pu avoir l'instruction de 1977.

1.1.2 LES CONSÉQUENCES DU CONTEXTE ACTUEL SUR L'HYDROLOGIE URBAINE

Le rappel historique précédent souligne les liens étroits entre l'urbanisation, le développement de l'assainissement et la place de l'eau en ville. L'urbanisation rassemble les activités humaines, augmentant la consommation d'eau et les rejets de polluants. Elle s'accompagne d'une imperméabilisation des sols et d'une artificialisation des écoulements *via* les réseaux de canalisation. Autrement dit, la ville se comporte alors comme un immense parapluie qui empêche l'eau de suivre son cycle naturel, couplé à un grand entonnoir, les réseaux, qui concentrent l'eau et la pollution dans des points de rejets limités. Les effets conjoints de cette anthropisation du territoire entraînent une redistribution des processus hydrologiques, résumée sur la Figure 1.2, et une dégradation de l'environnement. Cette sous-section détaille les conséquences de ce contexte sur l'hydrologie urbaine soulignant ainsi les limites de l'approche historique de la gestion des eaux pluviales.

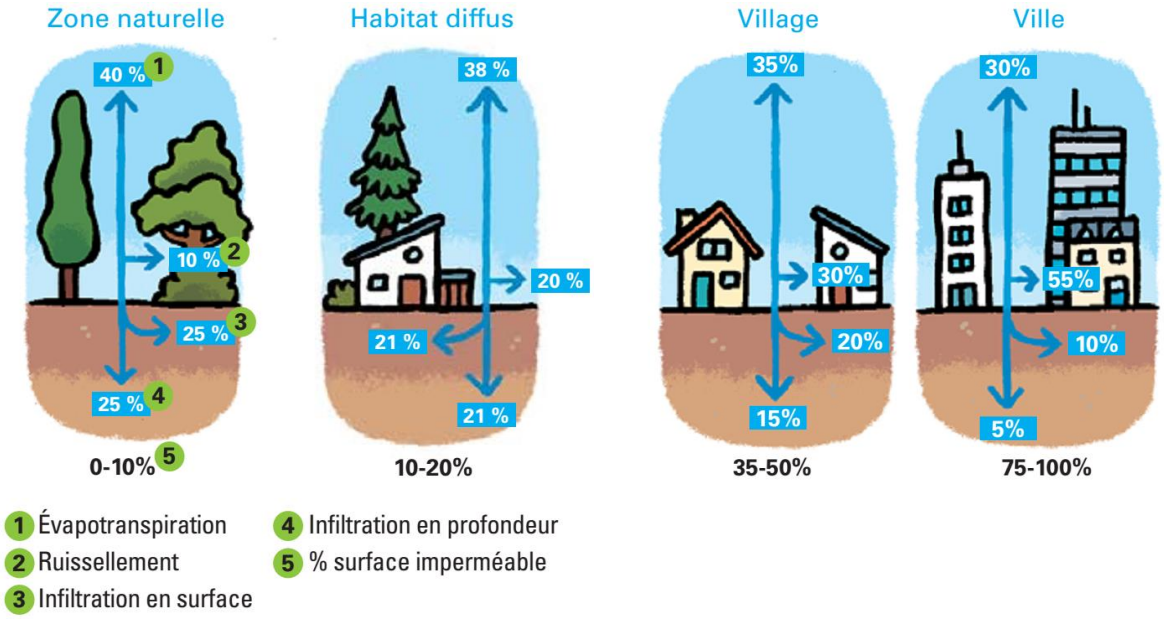


Figure 1.2 – Schématisation des conséquences du degré d'urbanisation sur le bilan hydrologique (Grand Lyon, 2008b)

1.1.2.1 MODIFICATION DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES, APPROCHE QUANTITATIVE

Les conséquences majeures de l'imperméabilisation généralement admises par la communauté scientifique sont l'accroissement et l'accélération du ruissellement, entraînant une aggravation du pic de crue (Abdo, 2007; Bertrand-Krajewski, 2006; Cosandey et Robinson, 2000; Jacobson, 2011; Salvadore et al., 2015). L'urbanisation modifie notablement la transformation pluie-débit du bassin versant avec une augmentation du volume ruisselé et du débit de pointe (Faleyeux, 2015; Haase, 2009) ainsi qu'une diminution du temps de concentration (Desbordes, 1989). Ces modifications sont représentées sur la Figure 1.3.

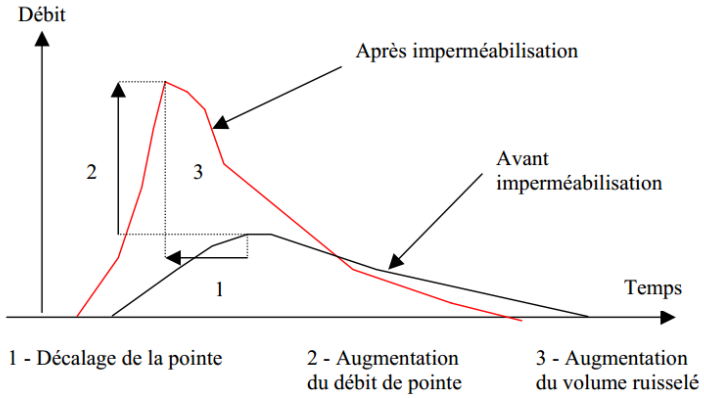


Figure 1.3 - Diagramme schématique des effets de l'imperméabilisation sur l'hydrogramme de débit à l'exutoire du bassin versant (CERTU, 2003)

La diminution du temps de réponse a également pour conséquence de rendre sensible le bassin versant à des évènements pluvieux de durées plus courtes, donc plus intenses aggravant encore l'augmentation du débit de pointe (Bertrand-Krajewski, 2006; Braud et al., 2013). Les villes deviennent alors soumises au risque d'inondations soudaines causées par des évènements pluvieux intenses et de courte durée. Ces inondations sont indépendantes de la présence d'un cours d'eau, elles sont dues à la saturation des réseaux ou à un ruissellement rapide lié à la topographie[3] (Barraud et Le Coustumer, 2008; Carbone et al., 2015; Chocat, 2015; Yin et al., 2016; Zhou, 2014). L'augmentation des flux et de la vitesse de ruissellement peuvent également aggraver des phénomènes d'inondations de crue à l'aval de la ville en entraînant une montée des eaux plus rapide et plus fréquente dans les rivières urbaines (Boogaard et al., 2014; Chocat, 2015; Grand Lyon, 2008a; Région Rhône Alpes, 2006; Zhou, 2014). À cette augmentation de l'aléa vient s'ajouter l'augmentation de la vulnérabilité du fait de la concentration de la population, des biens et des activités dans les villes, ce qui fait de l'urbanisation, une des raisons majeures à l'origine de l'augmentation du risque d'inondation (Grand Lyon, 2008b).

Pour vérifier ce lien entre l'évolution de l'aménagement du territoire et les conséquences attribuées à l'imperméabilisation, des chercheurs (Miller et al., 2014) ont étudié l'évolution de l'occupation du sol de deux agglomérations similaires au Royaume-Uni et en Suède entre 1960 et 2010 et ont démontré que le passage d'une imperméabilisation de 11 % à 44 % conjugué à la mise en œuvre d'un réseau de collecte des eaux pluviales était responsable d'une diminution du temps de concentration de 50 % et d'une augmentation du débit de pointe de plus de 400 %. Plusieurs études similaires confirment ces résultats (Jacobson, 2011) tout en soulignant que l'imperméabilisation seule n'explique pas toutes les modifications hydrologiques. De nombreux auteurs insistent notamment sur la notion de connectivité des surfaces imperméables en raison

[3] Exemple local : la ville de Caen a connu le 22 juillet 2013 une inondation soudaine de ce type.

du rôle déterminant des réseaux dans les écoulements urbains (Miller et al., 2014; Petrucci, 2012). Ils soulignent l'importance de différencier l'imperméabilisation totale et celle dite « efficace », composée des seules surfaces imperméables connectées au réseau d'assainissement.

L'imperméabilisation entraîne également une réduction de l'infiltration des eaux de pluie qui s'accompagne d'une moindre recharge des nappes conduisant à l'abaissement du débit de base dans les rivières urbaines ainsi qu'à des problèmes de subsidence (Barron et al., 2013; Braud et al., 2013; Cosandey et Robinson, 2000). La subsidence, conséquence de la réduction de l'infiltration, aggravée en cas de pompage de l'eau des nappes, entraîne l'augmentation des dégâts dus au tassement des sols sous les bâtiments. Ces dégâts constituent, avec les inondations, la première cause de sinistres en France (Chocat, 2015).

La réduction de la recharge des nappes pose également un problème de durabilité de la gestion de la ressource en eau douce et de soutien des débits d'étiage des rivières. La faible recharge hydrique diminue l'eau disponible pour la végétation en ville, contribuant à dégrader les conditions écologiques en milieu urbain (Braud et al., 2013; Chocat, 2015; Faleyeux, 2015; Grand Lyon, 2008b; Région Rhône Alpes, 2006).

L'imperméabilisation des sols s'accompagne aussi d'une diminution de l'évaporation et de l'évapotranspiration (Chocat, 2015; Salvadore et al., 2015), notamment en raison de la diminution de la végétation. L'air est naturellement moins humide ce qui contribue à l'augmentation des îlots de chaleur en ville (Faleyeux, 2015; Grand Lyon, 2008b). Les surfaces imperméables renforcent ce phénomène par leur capacité à emmagasiner et restituer de la chaleur. Ce climat sec et chaud accroît l'inconfort dans les villes jusqu'à devenir un problème de santé publique en cas de canicule, et il impacte également les espaces verts déjà dégradés par la réduction de l'infiltration.

Enfin, avec la création d'obstacles physiques (bâtiment, route, fondation) ou de cheminements préférentiels, l'urbanisation entraîne une modification de la circulation de l'eau. Les voies de circulation se superposent au relief naturel créant un relief artificiel qui peut modifier considérablement les écoulements de surface (Bertrand-Krajewski, 2006). Les constructions allant jusqu'à plusieurs niveaux de sous-sol peuvent perturber l'écoulement de la nappe sous-jacente et avoir des conséquences sur des habitations voisines. Par ailleurs, l'artificialisation des rivières urbaines ou périurbaines modifie leur comportement hydro-morphologique, notamment par leur incision. L'incision a des conséquences sur le risque d'inondation à l'aval, elle fragilise les ouvrages sur le cours d'eau et elle s'accompagne fréquemment d'une baisse du niveau de la nappe d'accompagnement. L'incision impacte également la biodiversité et augmente la sensibilité aux pollutions par les rejets urbains (Navratil, 2015).

1.1.2.2 DÉGRADATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU, DES SOLS ET DE L'ENVIRONNEMENT, APPROCHE QUALITATIVE

Les rejets urbains en eaux polluées peuvent être décomposés entre les rejets par temps secs, dus à la seule évacuation des eaux domestiques et industrielles, et les rejets par temps de pluie où s'ajoutent aux premiers rejets la pollution transportée par la pluie (Bertrand-Krajewski, 2006). Si l'impact des rejets par temps sec est de plus en plus maîtrisé, notamment avec la généralisation des stations d'épuration, celle des rejets par temps de pluie reste problématique compte tenu des volumes d'eau en jeu (Chocat, 2014). Dans la suite de ce travail, seule la pollution par temps de pluie sera considérée.

L'urbanisation s'accompagne d'une augmentation des sources de polluants et d'une concentration de la pollution dans les rejets vers les milieux récepteurs. Ce phénomène de concentration est dû au ruissellement des eaux pluviales et à la structure ramifiée des réseaux (Barraud, 2009; Faleyeux, 2015). Il peut être aggravé par les mécanismes de mobilisation des polluants, notamment le phénomène dit de « lessivage » qui mobilise lors de la première pluie, les polluants accumulés sur le sol lors de l'épisode sec précédent. En effet si la mobilisation des polluants est discontinue, leur production est quant à elle chronique, saisonnière et accidentelle (Abdo, 2007; Chocat, 2015).

L'eau douce est considérée unanimement comme une ressource rare à protéger. Plus cette ressource est proche des villes plus elle est précieuse. Dans le cas d'un unique réseau d'assainissement, au lieu d'être valorisée l'eau de pluie est utilisée pour diluer les eaux usées, la transformant ainsi en déchet. Déchet qui doit être ensuite évacué et traité en station d'épuration. Cette solution est coûteuse et conduit inévitablement à des débordements. Ces débordements ont des conséquences sur les milieux récepteurs et sont source d'inondations en ville (Chocat, 2014). Dans le cas d'un réseau séparatif, l'eau de pluie n'est pas ou peu traitée. Les exutoires du réseau reçoivent alors des pics de débits et de polluants lors des épisodes pluvieux conduisant à la dégradation du bon état écologique des milieux récepteurs (Astaraie-Imani et al., 2012). Les conséquences de l'urbanisation entraînant la dégradation de l'état écologique des milieux récepteurs sont résumées sur la Figure 1.4.

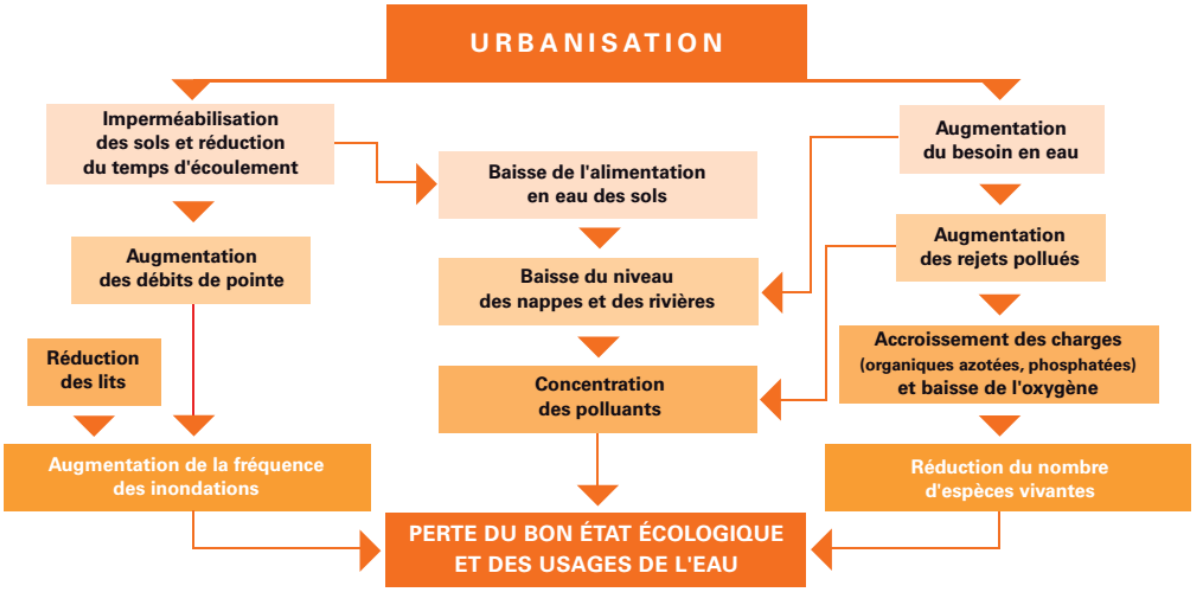


Figure 1.4 – Schéma de synthèse des conséquences de l'urbanisation sur l'hydrologie urbaine (Grand Lyon, 2008a)

Après l'eau, les sols sont une autre ressource précieuse des territoires. Le sol est la dénomination donnée à la partie meuble de la lithosphère, autrement appelée la couverture pédologique. Il est à l'interface entre différents milieux, la roche (lithosphère), l'eau (hydrosphère), l'air (atmosphère) et les êtres vivants (biosphère) (Robert, 1996). En tant qu'interface, il assure un rôle de système épurateur important pour l'environnement, ce qui le rend particulièrement sensible à la pollution.

Le sol est un espace qui offre des ressources importantes pour la construction de la ville (Guiraud, 2013). C'est le sol qui est le support principal des ouvrages de génie urbain. Ses propriétés, notamment sa capacité d'infiltration ou sa portance, sont des paramètres clefs pour

la conception des infrastructures. Le sol et le sous-sol offrent un espace, ou plus exactement un volume, pour les réseaux, le transport et la production de l'énergie (géothermie), ainsi que des matériaux pour la construction et l'aménagement de la ville. Or, il faut compter au minimum quelques centaines d'années voire des millénaires pour qu'un sol se développe, ce qui en fait une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. Cette ressource est également limitée, les sols cultivables ne représenteraient que 22 % de la surface des terres émergées (Robert, 1996). De plus, la ressource en sol est inégalement répartie entre les zones géographiques et n'est pas toujours exploitable dans de bonnes conditions.

Tout comme l'eau, les sols sont donc une ressource précieuse qu'il convient de protéger en évitant les principales causes de dégradation. Ces dégradations peuvent être classées en trois catégories :

- les dégradations physiques : la compaction, l'érosion, la disponibilité de l'eau (déficit ou excès) et la salinisation (liée à l'abaissement des nappes par exemple) ;
- les dégradations chimiques : appauvrissement en éléments nutritifs, acidification, excès de nutriments et d'éléments minéraux toxiques et excès ou déficit de composés organiques ;
- les dégradations biologiques : dégradation microbiologique, impact sur la faune et la flore, désertification.

En milieu urbain, la diminution de l'infiltration, la pollution ou encore la perturbation des écosystèmes contribuent fortement à dégrader la qualité des sols (Schirmer et al., 2013).

1.1.2.3 INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique, phénomène global au niveau planétaire lié au réchauffement de l'atmosphère, vient aggraver, et est aggravé par l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie urbaine (Astaraie-Imani et al., 2012; Jacobson, 2011). Ce changement climatique est un sujet de préoccupation majeur. Il était au cœur de la COP 21 à Paris en 2015, où l'eau figurait en 1ère place des préoccupations prioritaires des pays participants (Vauclin et Habets, 2015).

Ce changement climatique se traduit entre autres par un réchauffement global (Chocat, 2015; Roche et al., 2012) de +0.85°C en 2014 par rapport au début de l'ère industrielle d'après le 5ème rapport du GIEC (GIEC, 2014), par une accélération de ce réchauffement, par des précipitations plus intenses et plus fréquentes (Jha et al., 2012; Zhou, 2014), par une modification des débits d'étiage et de crue des fleuves (Vauclin et Habets, 2015). Le 5ème rapport du GIEC souligne également l'augmentation des pertes économiques dues aux inondations aggravées par l'urbanisation, l'élévation du niveau de la mer, l'érosion des côtes et l'augmentation du débit de certains cours d'eau (GIEC, 2014).En France, le changement climatique devrait conduire à une diminution de la ressource en eau et en impacter la qualité. Il entraînerait également une forte augmentation des sécheresses avec leurs conséquences en termes de conflits sur les usages de l'eau. D'après HABETS (Vauclin et Habets, 2015), parmi les efforts d'atténuation qui permettront de réduire fortement l'impact sur la ressource en eau, l'occupation des sols a une importance capitale comme élément régulateur ou amplificateur.

1.1.3 DÉFIS ET OPPORTUNITÉS DES VILLES ACTUELLES

Le contexte décrit précédemment, tant sur le plan de l'urbanisation que du changement climatique, impose de mettre en œuvre une gestion à la source de l'eau en ville tout en tenant compte du patrimoine existant. Pour sortir d'une logique de ville « parapluie » et « entonnoir » les chercheurs mettent en avant l'importance de la perméabilité, reprise par les politique chinois avec l'idée d'une ville « éponge ». L'objectif est de donner aux villes la capacité d'absorber l'eau et de favoriser les processus d'infiltration et d'évapotranspiration. Dans cet objectif, les techniques dites « alternatives » s'imposent de plus en plus pour la gestion des eaux pluviales. Plus globalement, les villes font face à de nombreux défis, à commencer par l'importance de la croissance de la population urbaine ou encore la pression sur l'utilisation du foncier. Ces défis peuvent être autant d'opportunités de penser la ville autrement en privilégiant une approche intégrée et résiliente.

1.1.3.1 LES TECHNIQUES ALTERNATIVES, UNE NOUVELLE APPROCHE POUR L'EAU EN VILLE

Les techniques alternatives s'inscrivent dans une vision durable de la gestion de l'eau qui implique de répondre aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins (Chocat, 2002). Les exigences imposées à un tel système sont : la fourniture de l'eau pour l'ensemble de ses utilisations, l'évacuation des eaux usées pour satisfaire aux exigences d'hygiène et la bonne gestion des eaux pluviales afin d'éviter les dommages causés par les inondations.

Cet objectif de « développement durable » se retrouve dans la dénomination retenue pour les techniques alternatives à l'étranger : au Royaume-Uni c'est le terme *Sustainable Urban Drainage System* (SUDS) qui est utilisé, au États-Unis et au Canada, deux dénominations sont employées, *Best Management Practices* (BMPs) et *Low Impact Development* (LID) enfin, en Australie, c'est l'appellation *Water sensitive Urban Design* (WSUD) qui a été adoptée.

Malgré ces différentes dénominations, toutes recouvrent des stratégies et des types de techniques similaires (Moura et al., 2007). La philosophie générale est de faire en sorte que le cycle hydrologique soit le moins modifié possible par la ville (Chocat, 2015). Bernard CHOCAT parle de ***« rendre la ville transparente pour l'eau »*** (Chocat, 2014). Pour atteindre cet objectif, trois principes sont au cœur de cette approche alternative (CERTU, 2003; Faleyeux, 2015; Région Rhône Alpes, 2006).

1. Limiter au strict nécessaire l'imperméabilisation des sols.
2. Éviter la concentration des rejets d'une part en favorisant toute autre solution d'exutoire de proximité pour limiter la collecte des eaux pluviales (réutilisation, restitution au milieu naturel), d'autre part en ralentissant les flux collectés.
3. Penser une conception de l'assainissement qui ne soit pas indépendante de celle de l'urbanisme.

Ces principes se déclinent en différentes techniques ou aménagements concrets dont une liste non exhaustive est proposée par la Figure 1.5.

Figure 1.5 - Représentation des principales techniques alternatives (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2013)

Historiquement, ces techniques alternatives ont particulièrement mis l'accent sur l'infiltration et le stockage. L'évolution de la gestion des eaux pluviales conduit aujourd'hui à intégrer de plus en plus le concept de *water balance* (notion nommée par la suite bilan hydrologique ou bilan global) qui prend en compte l'ensemble des processus hydrologiques (Petrucci, 2012). En effet, il ne s'agit pas seulement de regarder le ruissellement et l'infiltration mais de considérer l'ensemble des processus hydrologiques et notamment l'évapotranspiration qui peut représenter un volume d'eau annuel comparable voire supérieur à celui de l'infiltration en milieu urbain.

La mise en œuvre des techniques alternatives s'accompagne également d'une valorisation de l'eau en la rendant visible et source de valorisation du cadre de vie (Bertrand-Krajewski, 2006). En parallèle, la limitation de toute pollution des milieux récepteurs est un objectif clef de ces

techniques dont plusieurs jouent un rôle de filtration ou de décantation des eaux pluviales (Gires, 2012; Gromaire et al., 2013).

En Angleterre, le CIRIA (Woods Ballard et al., 2015) en charge de la diffusion des bonnes pratiques concernant les SUDS, propose une vision sous la forme de quatre types de bénéfices clefs qui résument bien les avantages des techniques alternatives, présentée sur la Figure 1.6.

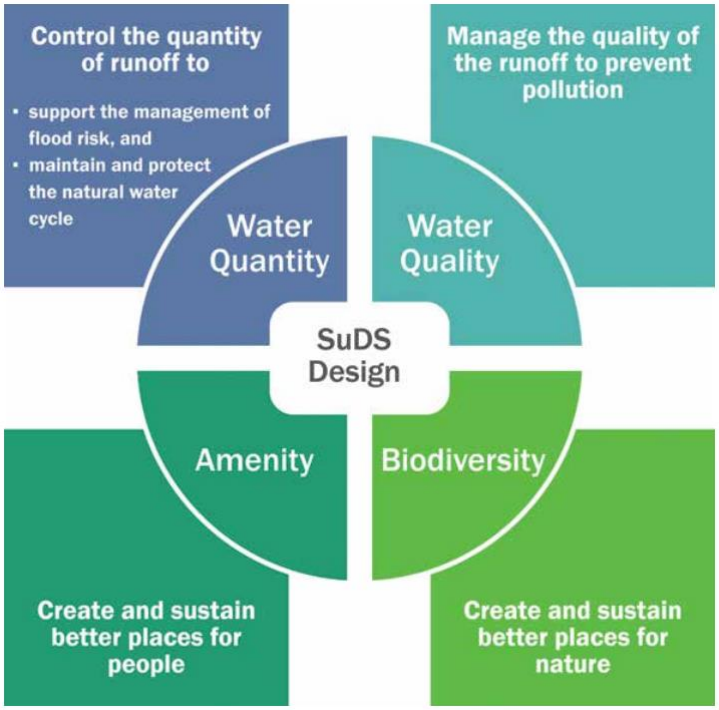


Figure 1.6 - Bénéfices apportés par les techniques alternatives. D'après le rapport 'SUDS manual' du CIRIA (Woods Ballard et al., 2015)

Enfin, l'approche alternative met en avant une gestion de proximité, dite à la source (Barraud, 2009). En effet, les différentes techniques ne centralisent pas l'eau mais gèrent la pluie localement. Cette gestion à la parcelle ne doit pas être une simple couche technique rajoutée sur les projets (Barroca et al., 2010) mais doit s'inscrire dans une véritable logique globale à l'échelle du bassin versant (CERTU, 2006). Cela peut être favorisé en développant des ensembles de techniques associées et complémentaires, appelés par les anglophones *integrated design traitement train* (Boogaard et al., 2014). La forme urbaine peut également venir compléter les solutions techniques dans la gestion de l'eau en intégrant aménagement urbain et assainissement (Grand Lyon, 2008a). Cette modification d'approche suppose une remise en cause de certaines habitudes et une évolution de la gouvernance et de l'organisation des acteurs, notamment des services de voirie et d'assainissement qui ne peuvent plus travailler indépendamment l'un de l'autre (Bertrand-Krajewski, 2006; Chocat, 2002).

1.1.3.2 UNE MULTIPLICITÉ DE DÉFIS

Selon un rapport de l'ONU (United Nations, 2014), 54 % de la population mondiale vivait dans les zones urbaines en 2014, proportion qui devrait passer à 66 % à l'horizon 2050. *« La gestion des zones urbaines est devenue l'un des défis de développement les plus importants du 21ème siècle »*, a déclaré le Directeur de la Division de la population, John WILMOTH. *« Le succès ou l'échec de la construction de villes durables sera un facteur important pour la réussite du programme de développement pour l'après-2015 »*.

En France, les zones urbaines concentrent aujourd'hui la majorité de la population, des activités et des richesses mais aussi des émissions de pollution. De nombreux défis doivent être relevés par les villes, allant de l'accessibilité à tous au développement de la mixité sociale et générationnelle, en passant par la ville numérique. GUIRAUD (Guiraud, 2013) présente ainsi 31 défis dont la moitié sont directement ou indirectement liés à la gestion des eaux pluviales.

> *(Guiraud, 2013), extrait choisi :*
> *« Lutter contre le réchauffement climatique ; s'adapter aux évolutions liées au changement climatique, régler le problème de pénurie de foncier et d'espaces naturels ; réduire l'imperméabilisation des sols ; développer une approche systémique des fonctions de la ville permettant une gestion optimale des interactions entre les approches sectorielles traditionnelles cloisonnées : transports, eaux, déchets, etc. ; faire cohabiter les différents modes de déplacement, et favoriser les modes de déplacement doux ; rendre les villes résilientes aux risques naturels et industriels ; limiter les nuisances sonores et les pollutions des eaux et des sols ; améliorer la qualité de l'air et de l'eau et du cadre de vie ; maîtriser les flux des eaux (potables, usées, pluviales) et les risques d'inondation ; préserver voire introduire plus de biodiversité ; développer des espaces de vie confortables et lisibles pour tous ; offrir une qualité de vie urbaine, un cadre de vie apaisant et sûr, permettant de mieux vivre, de mieux respirer, de mieux se déplacer. […]»*

Parmi ces enjeux, certains sont importants à détailler en vue de la suite de ce travail. En premier lieu, il convient de souligner l'importance d'une approche systémique. La multiplicité des défis des villes appelle à une gestion intégrée de l'aménagement urbain. De nombreux auteurs soulignent qu'il ne faut plus raisonner aujourd'hui en sectorisant les problèmes et les solutions à apporter, mais au contraire en voyant, dans chaque objet ou espace urbain, une opportunité pour apporter des solutions à un maximum de défis (Barraud et al., 2010; Fletcher et al., 2013). Cette approche intégrée favorise le passage d'une vision de l'eau comme une nuisance à évacuer à celle d'une ressource à valoriser.

De cette question de la sectorisation découle l'enjeu de la gouvernance de l'eau et de la gouvernance urbaine. La gouvernance de l'eau et de l'urbanisme ne se font pas encore à la même échelle territoriale. En effet, l'eau est principalement planifiée à un niveau de bassin et sous bassin versant (échelle départementale et régionale) alors que l'urbanisme est principalement planifié à l'échelle de la ville ou de l'agglomération. Ceci favorise le cloisonnement entre urbanisme et vision politique de la ville et réseau et vision technique de la ville (Boutelet-Blocaille et al., 2010). Cette différence d'échelle entraîne un problème dans la gouvernance de l'eau. Par exemple, la maîtrise des besoins en eau se heurte au fait que la protection de la ressource implique une limitation des activités en surface pour éviter toute pollution ou toute imperméabilisation. Mais la gestion de l'occupation des sols est de la responsabilité de la commune, donc difficile à encadrer par les dispositifs de planification de la gestion de l'eau que sont les SDAGE et les SAGE. Cela pose la question de comment la gouvernance de l'eau peut-elle être intégrée à celle de l'urbanisation et constituer un levier pour un urbanisme plus compatible avec les objectifs de développement durable (Boutelet-Blocaille et al., 2010).

Cet enjeu de la gouvernance technique de la ville est étroitement dépendant du patrimoine existant pour la gestion de l'eau. Dans les pays développés les réseaux urbains se sont constitués depuis quasiment deux siècles. Ils ont aujourd'hui une valeur patrimoniale très importante se

chiffrant souvent en milliards d'euros et il faudrait probablement plus d'un siècle avec les montants actuels d'investissement pour les reconstruire (Chocat, 2014). Or, l'ensemble des acteurs partagent l'idée que le « tout tuyau » n'est plus une solution viable techniquement et économiquement (Barraud et Le Coustumer, 2008; Boutelet-Blocaille et al., 2010; Chocat, 2015). En effet, la capacité maximum de certains réseaux commence à être atteinte et ne permet plus de répondre au débit engendré par les évènements climatiques importants (Région Rhône Alpes, 2006; Zhou, 2014) ni de permettre, à un coût raisonnable, le raccordement de nouvelles zones imperméables (Faleyeux, 2015). L'enjeu est d'intégrer ces réseaux existants à une gestion globale des eaux urbaines, en limitant au maximum la création de nouveaux réseaux et en profitant des opérations de rénovation pour remplacer les anciens réseaux par des techniques alternatives couplées au besoin par des réseaux redimensionnés.

Dans de nombreuses villes de pays en développement, la situation est tout autre. Ces villes ne possèdent généralement pas ou peu de réseaux urbains et il semble très difficile (voire non souhaitable) économiquement, d'envisager la réalisation de réseaux similaire à ceux des pays dits développés (Chocat, 2014). Il y a ici un enjeu de recherche très important afin de proposer des solutions de gestion des eaux urbaines durables, économiques, rapidement réalisables et modulables pour s'adapter à la croissance de ces villes.

1.1.3.3 MAÎTRISER LES RISQUES D'INONDATION ET RENDRE LES VILLES RÉSILIENTES

a. L'importance du risque d'inondation

À l'échelle mondiale les inondations sont les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus lourdes. Leur nombre et leur intensité sont en constante évolution sur les vingt dernières années (Figure 1.7) (Jha et al., 2012). Un nombre important d'inondations d'une période de retour supérieure à 100 ans sont ainsi survenues depuis le début des années 2000 : à Prague en 2002, au Royaume-Uni en 2007, au Pakistan en 2010, à New York en 2012, etc. ; liste à laquelle pourraient être ajoutés les deux épisodes d'inondations récents qu'a connu le bassin parisien en 2016 et 2018 avec des évènements proches d'une crue centennale.

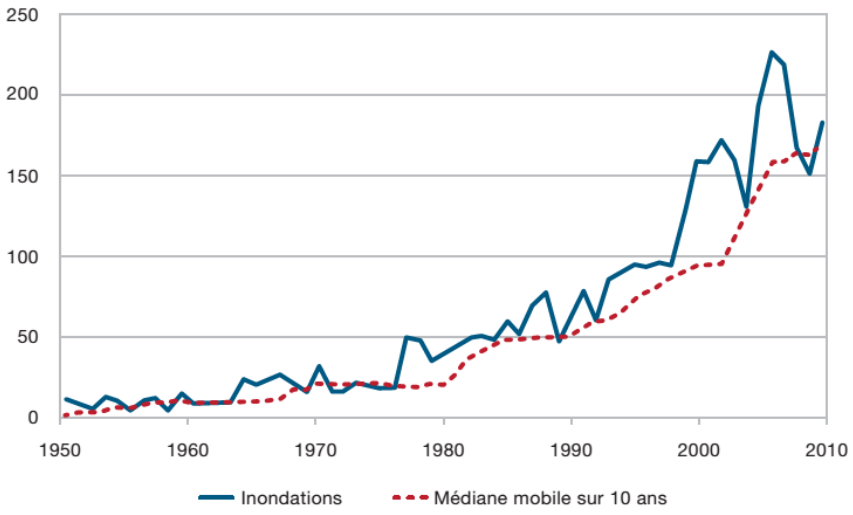


Figure 1.7 – Évolution du nombre d'inondations majeures déclarées dans le monde de 1950 à 2010 (Jha et al., 2012)

En France, le risque d'inondation concerne une commune sur trois et les dégâts causés représentent environ 80 % du coût des dommages imputables aux risques naturels (Techniques de l'Ingénieur, 2013). En milieu urbain l'exposition au risque d'inondation a été renforcée par le

sentiment de sécurité apporté par la réalisation de grands aménagements fluviaux depuis les Trente Glorieuses. L'impression de maîtrise du risque a conduit au développement de nombreuses villes dans des espaces soumis au risque d'inondation. Aujourd'hui, en France quatre à cinq millions de personnes vivraient en zones inondables (Rode, 2008).

Par ailleurs, l'essor du développement durable conduit à intégrer les services socio-écologiques de l'eau en ville. La proximité de l'eau devient alors une opportunité de valorisation foncière pour les aménageurs. Dans un contexte de pression urbaine, cette vision de la ville durable valorise la présence de l'eau, renforce et justifie la tendance des villes à mener des opérations en zones humides ou inondables (Gralepois et Guevara, 2015). L'eau en ville est ainsi approchée de manière paradoxale, d'une part comme un atout pour l'attractivité du territoire, d'autre part comme un danger qui reste incontrôlable (Bigand et al., 2012).

b. Les différents types d'inondation

Les inondations urbaines peuvent être de différents types :

- inondations soudaines, dues aux eaux de ruissellement locales ou des bassins versants amont, et/ou dues à la surcharge du réseau d'évacuation (en raison de leur limite de capacité ou de leurs pertes de performances par colmatage ou sédimentation) ;
- inondations fluviales (par crue) dues aux rivières et cours d'eau ;
- inondations côtières (ou maritimes) par la mer ;
- inondations par remontées de nappes naturelles.

Ces différents mécanismes d'inondation peuvent être concomitants et s'autoalimenter entre eux (Bigand et al., 2012; CERTU, 2006; Techniques de l'Ingénieur, 2013). Dans le cadre de ce travail, les principaux impacts étudiés concerneront les inondations soudaines par ruissellement de surface ou débordement des réseaux d'assainissement.

c. Les facteurs d'aggravation du risque d'inondation

L'urbanisation des zones inondables et l'imperméabilisation des sols amplifient fortement le risque d'inondation en milieu urbain (Techniques de l'Ingénieur, 2013). Le principe de dimensionnement des réseaux, généralement avec une période de retour de dix ans, implique également dès la conception un risque de débordement fréquent (Chocat, 2014). À cela s'ajoute l'impact de l'urbanisation périurbaine, souvent en hauteur donc en amont des bassins, qui a tendance à concentrer les flux dans les centres villes et à saturer plus rapidement les réseaux existants, renforçant alors le risque d'inondation (Abdo, 2007). Le pompage des nappes est aussi une source d'aggravation car il peut s'accompagner d'un affaissement des sols par tassement (Jha et al., 2012).

Comme mentionné précédemment, les facteurs climatiques viennent aggraver ce risque, notamment par l'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des orages (Carbone et al., 2015; Jha et al., 2012). Pour cette raison, l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) a identifié en 2013 l'augmentation des inondations et du risque d'inondations soudaines en milieu urbain comme l'un des enjeux majeurs pour l'Europe (OECD, 2013).

d. La lutte contre les inondations

Il convient de rappeler ici qu'un risque est la confrontation d'un aléa et d'un enjeu (Meylan et al., 2008). Aussi face à un risque naturel la société doit déterminer le niveau de risque acceptable pour définir le degré de protection souhaité (Bigand et al., 2012).

Les mesures de gestion des inondations sont à la fois structurelles et non structurelles (Jha et al., 2012). Les premières comprennent les ouvrages d'ingénierie tels que : les digues, les bassins, les barrages et écluses, les berges. Ces techniques peuvent s'avérer efficaces quand elles sont bien adaptées au site mais comportent toujours une limite (hauteur de digue, capacité de stockage, etc.) pouvant être dépassée et provoquer alors des dégâts considérables (Bigand et al., 2012). Les techniques alternatives d'assainissement urbain rentrent dans cette première catégorie qui cherche à diminuer la « probabilité » du risque. Les mesures non structurelles regroupent l'ensemble des actions de prévention, sensibilisation et action pendant et après l'évènement pour en limiter l'ampleur (Jha et al., 2012). Ces mesures visent à réduire les « conséquences » du risque (Meylan et al., 2008).

e. La gestion intégrée du risque – Vers la ville résiliente

L'objectif de gestion intégrée du risque implique d'une part la prise en compte des enjeux hydrologiques dans l'aménagement urbain et d'autre part la généralisation du contrôle à la source (en amont) des flux pour éviter leur concentration. Une gestion à la source qui doit être pensée de façon globale et durable (Bigand et al., 2012). Il s'agit à la fois de prendre en compte les aspects temporels et spatiaux (Jha et al., 2012). Dans cette logique de vision globale, PETRUCCI préconise l'utilisation de réglementation de volume, comme un des premiers moyens d'action (Petrucci, 2012). En effet, une approche par débit régulé peut être contre-productive si elle conduit à augmenter le débit à l'exutoire par l'allongement du temps d'évacuation de l'eau.

Dans cette logique de gestion intégrée, la rue peut être pensée pour servir de vecteur temporaire d'évacuation de l'eau lors des évènements importants. En étant conçue pour que l'eau atteigne des hauteurs raisonnables et des vitesses limitées la forme urbaine peut participer au transport de l'eau vers des espaces d'inondations temporaires, protégeant ainsi les zones plus sensibles (Bertrand-Krajewski, 2006). Ces stratégies de gestion intégrée du risque doivent être conçues de manière concomitante avec celles de gestion de la ressource en eau et de la réhabilitation urbaine en associant tous les intervenants concernés par ces thématiques. Enfin, il est important que les mesures soient modulables pour s'adapter aux évolutions des conditions naturelles, sociales et économiques (Jha et al., 2012).

Penser la « ville résiliente » c'est aller plus loin que seulement « mieux subir » les inondations, c'est développer des secteurs d'activités liés aux inondations (agriculture en zones inondables, etc.) et construire la ville de manière à la faire cohabiter paisiblement avec l'évènement d'inondations récurrentes (Bigand et al., 2012). Accepter sa vulnérabilité et la comprendre permet d'être mieux équipé pour faire face aux aléas extrêmes quand ils surviendront. La résilience permet une approche des aléas qui ne soit plus vue comme une catastrophe mais comme des évènements acceptés et valorisés (Gralepois et Guevara, 2015) à l'image de la civilisation égyptienne qui voyait les crues du Nil comme une bénédiction et non un risque. Cette approche permet de mettre en avant les différents services systémiques assurés par les cours d'eau pour mieux les valoriser et les favoriser en milieu urbain (Gralepois et Guevara, 2015).

1.1.3.4 LES MUTATIONS DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE, UNE OPPORTUNITÉ POUR L'ACTION

Pour terminer cette sous-section sur les défis des villes, une attention particulière est donnée ici à l'aménagement et l'occupation du territoire. L'urbanisation s'est pendant un temps caractérisée par un développement de grands ensembles ou de villes nouvelles. Les années 1970 ont vu la remise en cause de ce modèle pour aller vers un urbanisme d'habitat non collectif favorisé par les politiques publiques d'aides à l'accession à la propriété et la généralisation de l'utilisation de la voiture. Ce desserrement résidentiel s'est traduit par un processus de périurbanisation porté par les promoteurs privés et les maires des bourgs proches des grandes villes (Boutelet-Blocaille et al., 2010). Il en résulte un étalement urbain croissant (+50 % de population en péri-urbain entre 1900 et 1999). Cette périurbanisation s'effectue en consommant de l'espace agricole et en augmentant la dépendance à la voiture. Ainsi, en France, plus de 87 % des territoires nouvellement artificialisés entre 2006 et 2012 sont prélevés sur des territoires agricoles, d'après les données 2015 de l'étude européenne CORINE LandCover analysées par le Commissariat Général au Développement Durable (Janvier et al., 2015). Actuellement, les villes de l'ouest de la France dont Caen sont particulièrement concernées par ce phénomène de périurbanisation (Janvier et al., 2015). Cet urbanisme qui ne favorise pas le développement durable des villes est aujourd'hui remis en cause (Virely, 2017).

Cet étalement urbain a aussi été possible grâce au déploiement de réseaux, notamment d'eau et d'assainissement et à la multiplication de la place accordée à la voirie. Or plusieurs études (Coutard, 2008; Halleux et Lambotte, 2005) montrent que plus la superficie moyenne des parcelles est importante, plus le coût des réseaux de distribution est élevé. Le modèle de l'étalement urbain entraîne donc un coût important à la fois d'investissement et de fonctionnement. Il s'accompagne également d'une imperméabilisation des sols qui modifie l'hydrologie urbaine (Cosandey et Robinson, 2000) entraînant les conséquences évoquées précédemment. Aussi il faut être vigilant dans la promotion des techniques alternatives, à ce qu'elles ne favorisent pas la conquête de nouveaux espaces, pas encore urbanisés, pour les rendre urbanisables à moindre frais (Haase, 2009; Miller et al., 2014). Au contraire, il est souhaitable que ces techniques participent à limiter l'étalement urbain en favorisant la reconstruction de la ville sur elle-même.

1.2 LES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

1.2.1 DÉFINITION DES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Une des solutions pour construire une ville « éponge » qui puisse répondre aux défis listés précédemment est le recours aux revêtements perméables. L'idée est de convertir une partie de la couverture imperméable des routes, trottoirs, parkings, en une surface perméable à l'eau. De façon imagée, il s'agit de passer du parapluie à la passoire. Ici, parler seulement du revêtement de surface serait insuffisant. Une fois l'eau absorbée il faut la stocker puis l'évacuer ce qui demande de prévoir une fondation adaptée sous la couche perméable de surface. Cette sous-section définit le terme « structure à revêtements perméables » et la réalité des ouvrages qu'il désigne.

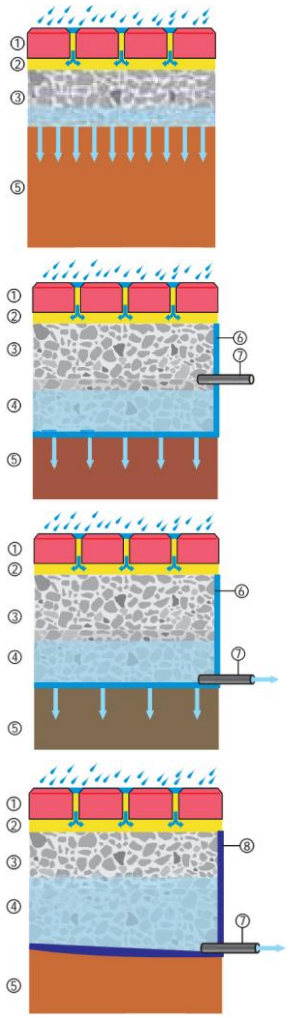
1.2.1.1 VOCABULAIRE ET DÉFINITION GÉNÉRALE

Parmi les différentes techniques alternatives qui existent, ce travail de recherche s'intéresse en particulier aux revêtements perméables. Cette désignation recouvre un certain nombre de matériaux et de types d'ouvrages différents, les plus cités dans la littérature française étant la chaussée à structure drainante ou les chaussées réservoirs (Pays de la Loire, s. d.; Région Rhône Alpes, 2006).

L'étude de ces ouvrages ne se limite pas à la couche en surface mais doit prendre en compte les couches de fondation et les propriétés du sol sous-jacent. Ces ouvrages peuvent par ailleurs se retrouver sur différents types d'usage : chaussées, parkings, voies vertes, etc. C'est pourquoi dans la suite de ce travail le terme « structure à revêtements perméables » sera utilisé, pour désigner non pas seulement le matériau de surface mais l'ensemble de la structure.

Les structures à revêtements perméables viennent en réponse à l'une des conséquences les plus importantes de l'urbanisation, l'imperméabilisation des sols. Grâce à une couche de surface perméable ces ouvrages permettent à l'eau de pluie de s'infiltrer au plus proche de l'endroit où elle tombe (Faleyeux, 2015). Cette eau percole ensuite à l'intérieur de la structure dont la couche de fondation assure également, dans la majorité des cas, un rôle de stockage, la hauteur de cette couche permettant de faire varier le volume de stockage disponible. Enfin, l'eau est évacuée par les processus hydrologiques naturels, évaporation, infiltration dans le sol (en fonction de la perméabilité et de l'environnement), éventuellement complétés par un drain dont la position dans la structure va influencer sa capacité de stockage (Barraud et al., 2010; Beeldens et al., 2008; Hunt et Collins, 2008; Tennis et al., 2004).

L'eau étant préférentiellement infiltrée dans le sol, dans la mesure du possible, le fonctionnement de ces structures dépend en premier lieu des propriétés du sol sous-jacent. (Beeldens et al., 2008). La Figure 1.8 présente un aperçu de différentes conceptions de structures à revêtements perméables en fonction des possibilités d'infiltration dans le sol.



Cas 1 : sol très perméable

Toute l'eau s'infiltre directement dans le sol. Une sous-fondation n'est pas nécessaire, ni un drainage supplémentaire.

Cas 2 : sol bien perméable

L'eau s'infiltre en grande partie après le stockage dans la sous-fondation. Une évacuation est réalisée entre la fondation et la sous-fondation afin d'éviter toute stagnation prolongée dans la fondation.

Cas 3 : sol modérément voir peu perméable

L'eau s'infiltre seulement de manière très limitée dans le sol. L'eau résiduelle est stockée dans la sous-fondation et évacuée *via* un dispositif de drainage. Celui-ci passe par un réducteur de débit, ce qui permet une évacuation différée vers les fossés, les dispositifs d'infiltration ou les caniveaux situés à proximité. La structure perméable sert surtout de dispositif de stockage.

Cas 4 : aucune infiltration possible

Une membrane imperméable est placée sur le fond du coffre et autour de la structure. L'évacuation différée s'effectue sous la structure. Une pente minimale de 2,5 % est prévue sous la structure afin que toute l'eau puisse être évacuée. Le stockage de l'eau s'effectue toujours dans la sous-fondation.

1. Pavés drainants
2. Couche de pose
3. Fondation
4. Sous-fondation
5. Sol
6. Géotextile non tissé
7. Tuyau d'évacuation avec réducteur de débit
8. Membrane perméable

Figure 1.8 – Conception et évacuation de l'eau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008)

1.2.1.2 LES DIFFÉRENTS COMPOSANTS DES STRUCTURES PERMÉABLES

Comme expliqué précédemment les structures à revêtements perméables sont composées d'une succession de couches et de matériaux différents qui assurent un rôle spécifique dans le fonctionnement globale de l'ouvrage.

1. Couche de surface : Cette couche est particulièrement importante. Le type de matériaux utilisé va permettre ou non différents usages en surface, et sa perméabilité va définir la quantité d'eau maximum qui peut entrer dans la structure. Cette couche de surface assure donc à la fois un rôle hydraulique, l'introduction de l'eau dans le dispositif, un rôle fonctionnel en étant la couche de roulement, et un rôle esthétique en participant à la construction visuelle de la forme urbaine (Chocat, 2015; Tennis et al., 2004). Plusieurs matériaux peuvent être utilisés, les plus courants étant ; le béton drainant, le bitume drainant, les pavés à joints larges et les structures alvéolaires végétalisées ou avec gravillons (Faleyeux, 2015; Hunt et Collins, 2008). Des exemples de différents revêtements de surface sont présentés sur la Figure 1.10. Dans la suite de ce travail le seul matériau de couche de surface étudié sera le béton drainant.

2. **Lit de pose :** le lit de pose se trouve juste sous la couche de surface. Composé de gravillons et d'une épaisseur de 3 à 4 centimètres il assure deux fonctions : assurer la planimétrie pour la mise en œuvre de la couche de surface et répartir les charges et les flux d'eau qui arrivent depuis la couche de surface vers la couche de fondation (Sanudo-Fontaneda et al., 2013).

3 & 4. **Couche de fondation :** Parfois différenciée en une couche de fondation (3) et une couche de sous-fondation (4), cette couche représente la majorité de la structure. Comme pour une chaussée traditionnelle, elle assure le rôle mécanique de supporter la couche de surface et les charges exercées dessus tout en transférant les charges vers le sol. Elle assure également plusieurs rôles hydrauliques : transférer l'eau depuis le lit de pose jusqu'au fond de la structure, stocker l'eau, permettre l'infiltration dans le sol et/ou le transfert de l'eau vers le drain (Abdo, 2007; Abdo et Monfront, 2011; Dawson, 2009). Cette couche est généralement composée de graviers dont la granulométrie est soigneusement étudiée pour optimiser les fonctions mécaniques et hydrauliques.

6. **Géotextile(s) :** Les géotextiles sont des produits textiles adaptés au génie civil qui se présentent généralement sous forme de nappes de fibres synthétiques, perméables, souples et résistantes. Au niveau mécanique, ils assurent un renforcement (au niveau du sol notamment), une protection (antipoinçonnement) et une séparation (rôle d'écran entre deux milieux différents pour empêcher leur interpénétration) (Figure 1.9). Au niveau hydraulique, ils permettent de filtrer l'eau et de mieux répartir le drainage. Ces géotextiles peuvent être utilisés entre le lit de pose et la couche de fondation, notamment pour leur rôle de filtration et de séparation. Ils sont systématiquement utilisés entre la couche de fondation et le sol ; en cas d'infiltration pour assurer la séparation entre les milieux, ou en présence d'une géomembrane pour en assurer la protection (Abdo, 2007; Sanudo-Fontaneda et al., 2013).

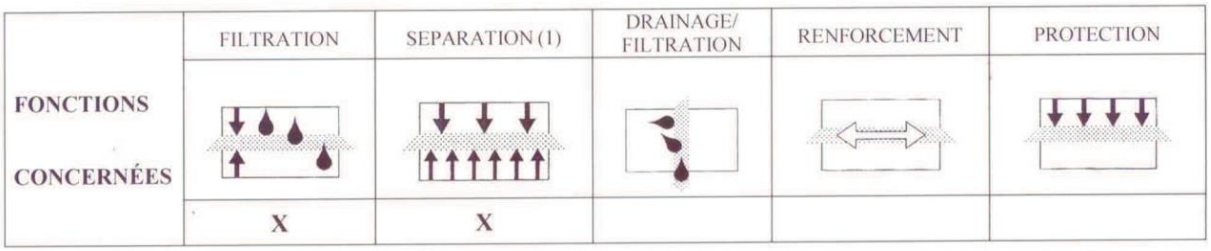


Figure 1.9 – Schéma des différentes fonctions possibles pour les géotextiles utilisés dans les structures à revêtements perméables ; extrait de fiche technique.

6. **Géomembrane :** Les géomembranes sont utilisées pour imperméabiliser le sol support dans le cas où il n'y a pas d'infiltration possible ou pas souhaitée (Abdo, 2007). L'infiltration peut être rendue impossible par un sol non perméable, sensible au retrait/gonflement (sol argileux) ou encore en raison d'un risque de contamination du sol. Les géomembranes sont généralement utilisées avec un géotextile pour les protéger du risque de poinçonnement.

7. **Drain :** tubes munis de trous ou de fentes, ils peuvent avoir deux rôles bien différents. Soit la collecte et la diffusion des eaux de ruissellement dans la fondation, si le revêtement de surface n'est pas perméable par exemple ; soit l'évacuation des eaux stockées dans la fondation vers un exutoire (le réseau d'eaux pluviales, le milieu naturel, etc.) (Abdo, 2007). Dans le cadre de ce travail, le revêtement de surface sera toujours considéré comme perméable, donc les drains seront exclusivement présents pour leur rôle d'évacuation. La position du drain dans la couche de fondation est un aspect essentiel du dimensionnement de la structure.

1.2.1.3 APPLICATIONS ET USAGES DES STRUCTURES PERMÉABLES

Les structures à revêtements perméables peuvent avoir différents usages en fonction du type de matériaux utilisés pour la couche de surface (Figure 1.10). Avec un revêtement en béton perméable, ces structures peuvent être utilisées pour des zones de stationnement, des rues de faible trafic, des places, des pistes cyclables, des voies piétonnes, etc. (Beeldens et al., 2008; Faleyeux, 2015). Elles peuvent aussi avoir des usages plus spécifiques : cours de tennis, abords de piscines, terrasses, etc. (Tennis et al., 2004).

Accès de la caserne de pompiers, Colmar

Parking de la place Saint-Etienne devant la cathédrale, Auxerre

Parking vélo/moto, Bordeaux

Emplacements de parking, St Grégoire

Emplacements de parking, Lyss (Suisse)

Parking de l'Observatoire des énergies renouvelables, Oberhausbergen

Figure 1.10 - Exemples d'usages des revêtements perméables pour l'infiltration des eaux pluviales (Faleyeux, 2015)

Selon les sites, ces structures peuvent être uniquement destinées à recevoir les eaux pluviales directes ou à servir également d'exutoires pour des eaux de ruissellement amont. L'addition de différents usages, assainissement et voirie, fait de ces ouvrages une solution particulièrement adaptée dans les villes où la densité du bâti et la pression foncière empêchent économiquement l'aménagement de bassin de stockage ou de nouveaux collecteurs (Abdo, 2007).

1.2.2 ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Depuis le début des années 1990, de nombreuses études scientifiques sont menées sur les structures à revêtements perméables, leurs performances et leurs limites. Ces études ont permis de montrer que ces structures représentent une technique intéressante pour la gestion alternative des eaux pluviales. Les bénéfices apportés vont de la réduction du ruissellement urbain à la diminution de la pollution des milieux récepteurs en passant par la recharge potentielle des nappes souterraines, la réduction de l'effet d'îlot de chaleur, l'amélioration du confort de circulation (bruit, sécurité), etc. Cette sous-section développe les bénéfices et les limites généralement admises pour les structures à revêtements perméables.

1.2.2.1 LES BÉNÉFICES DES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Les bénéfices des structures à revêtements perméables sont largement développés dans la littérature (Agouridis, et al., 2011; Barraud et al., 2010; Bean et Bidelspach, 2004; Brattebo et Booth, 2003; Faleyeux, 2015; Hunt, 2011; Tennis et al., 2004). Les principaux avantages liés à l'utilisation de ces structures mis en avant dans la littérature sont développés ci-dessous.

- **Rendre la ville transparente à l'eau.** Un des atouts principaux des revêtements perméables est de rétablir un fonctionnement hydrologique proche du cycle de l'eau dans un milieu non urbanisé (Hollenbeck et Göbel, 2013). Ces revêtements rendent la surface du sol « transparente » pour l'eau (Agouridis, et al., 2011).
- **La réduction du ruissellement et du risque d'inondations.** De par leur capacité à absorber l'eau de surface, les structures à revêtements perméables contribuent à la réduction du ruissellement urbain. Ces structures permettent de recueillir et stocker l'eau de pluie, ralentissant et diminuant les débits ruisselés (Bean et Bidelspach, 2004; Jayasuriya et Kadurupokune, 2008). Situées en amont de la zone à risque, ces structures peuvent ainsi contribuer à limiter le risque d'inondation par ruissellement ou par surcharge des réseaux.
- **Le renouvellement des nappes phréatiques.** Si l'infiltration est possible, l'utilisation des revêtements perméables permet la réalimentation des nappes, limitant ainsi les risques liés à l'affaissement du sol et permettant le renouvellement de la ressource en eau de manière durable (Abdo, 2007). Le renouvellement des nappes permet également de lutter contre les problèmes d'érosion des cours d'eau et d'intrusion d'eau salée dans les nappes.
- **L'augmentation de l'évapotranspiration.** Souvent oubliée dans l'équilibre de l'eau en milieu urbain, l'évapotranspiration constitue un exutoire important pour l'eau pluviale stockée dans la structure des revêtements perméables. Plusieurs études ont montré que l'utilisation de revêtements perméables permet l'obtention de taux d'évapotranspiration améliorés par rapport à des chaussées standard (Hollenbeck et Göbel, 2013; Qin et Hiller, 2016). GÖBEL présente des résultats sur l'optimisation de la conception des revêtements permettant d'obtenir une évapotranspiration jusqu'à 240 % plus élevée qu'avec un revêtement imperméable traditionnel (Göbel, Strake, Meber et al., 2013). Cette amélioration peut s'expliquer, d'une part, par les phénomènes de remontée capillaire au sein des structures perméables permettant d'évacuer par évaporation une partie de l'eau stockée dans structure (Dawson, 2009), d'autre part, grâce au soutien de la croissance de la végétation par un meilleur transfert de l'eau et de l'air aux racines des arbres.
- **La réduction des îlots de chaleur.** En plus de contribuer à l'évacuation de l'eau, l'évapotranspiration a des effets positifs sur l'air urbain. Consommateur d'énergie, ce

processus permet de réduire l'effet d'îlot de chaleur et d'améliorer le climat des villes (Dawson, 2009; Göbel, Strake, Meber et al., 2013; Li et al., 2014). Ce bénéfice est d'autant plus important que les villes font de plus en plus face à des épisodes de canicule importants qui risquent d'être aggravés par le changement climatique (GIEC, 2014).

- **La protection du sol.** Les résultats de plusieurs recherches montrent que les structures à revêtements perméables ont un effet positif sur la qualité de l'eau et la réduction de la pollution des milieux (Abdo, 2007; Agouridis et al., 2011; Bean et Bidelspach, 2004; Chocat et al., 2012; Faleyeux, 2015). Ce bénéfice s'explique par la gestion des polluants à la source permise par la limitation du ruissellement, et par la filtration de l'eau lors de son infiltration dans la structure. En effet, différents résultats montrent que ces structures filtrent les polluants sur les premiers centimètres, protégeant le sol de la pollution (Huang et al., 2016; Jayasuriya et Kadurupokune, 2008; Legret et Colandini, 1999). Cette question du rôle filtrant des structures perméables représente encore aujourd'hui un enjeu majeur de recherche. Elle sera volontairement laissée de côté par la suite, ce travail se focalisant seulement sur une approche quantitative et non qualitative.
- **La maîtrise des coûts.** La pertinence économique des revêtements perméables doit être à la fois comparée à une utilisation traditionnelle de voiries imperméables avec réseau d'assainissement et aux autres techniques alternatives existantes. Concernant la comparaison avec les revêtements classiques, la littérature fait état d'un surcoût initial pour la réalisation du revêtement qui est compensé par l'absence (ou la forte réduction) d'avaloirs, de caniveaux et de réseaux permettant d'arriver à un prix du même ordre, voire à un gain (Garrigues, 2013). Ce gain pouvant aller de l'ordre de 2 % sur le poste VRD (CERTU, 2006) jusqu'à un gain de 15 à 80 % d'après une étude de l'EPA (Agouridis et al., 2011). Certaines études prennent également en compte la durée de vie, la maintenance et la potentielle réutilisation du sol et montrent alors que les revêtements perméables permettent un gain économique important (Abdo et Monfront, 2011).

  Ensuite, il convient de comparer les revêtements perméables avec les autres techniques alternatives. Même si certaines études donnent des éléments de comparaison (CERTU, 2006), leur validité reste limitée étant donnée l'importance du contexte et la diversité de ces techniques (Chocat, 2009). Les résultats sont également fortement liés à la méthode de comparaison employée : prise en compte du coût du foncier, répartition du coût de réalisation des ouvrages en cas de multi-usages, prise en compte du coût de la maintenance, etc. Compte tenu de l'absence d'emprise foncière dédiée, les revêtements perméables sont avantageux économiquement en milieu urbain dense ou à forte pression foncière.
- **Esthétique, confort et sécurité.** Les revêtements perméables assurent l'infiltration rapide de l'eau, évitant sa stagnation et donc la formation de flaques, les projections ou le risque d'aquaplanage (Faleyeux, 2015). Ils améliorent ainsi la sécurité en permettant une meilleure adhérence par temps de pluie (Dawson, 2009). Par ailleurs, leur porosité permet également de réduire les bruits de roulement des véhicules, en moyenne d'environ 3 à 5 dB(A) (Dawson, 2009), assurant un meilleur confort sonore (Abdo, 2007). Enfin, l'utilisation de revêtements clairs ou de couleurs différentes permet de faire varier le marquage au sol, améliorant l'esthétisme et la visibilité des différents espaces de la route (pistes cyclables, passages piéton, places, etc.). Ce jeu sur les aspects de surface permet de provoquer spontanément chez les usagers des comportements de conduite apaisée, améliorant la sécurité routière en ville (Abdo, 2007).

1.2.2.2 LES RISQUES ET LIMITES DE L'UTILISATION DES STRUCTURES PERMÉABLES

L'utilisation de structures à revêtements perméables peut présenter certains risques qui sont également abordés dans la littérature (Moura et al., 2007). Certains de ces risques sont avérés et demandent une prise en considération adaptée, d'autres relèvent plus de l'ordre du « fantasme » ou d'une exagération comme le montre CHOCAT à propos des risques supposés des techniques d'infiltration (Chocat, 2015). Les principaux risques avérés et leur prise en considération sont développés ici.

- **La pollution des eaux souterraines et du sol.** Le risque est que l'ouvrage n'assure pas une filtration satisfaisante de l'eau et que son infiltration dans le sol entraîne une pollution du site voire une pollution des eaux souterraines (Abdo, 2007; Fletcher et al., 2013). Les méthodes de prévention et de réduction de ce risque mises en avant dans la littérature se concentrent sur la prise en compte de l'environnement de l'ouvrage, la proximité de la nappe (avec comme critère communément admis un toit de la nappe à plus d'un mètre de profondeur), la vulnérabilité de la nappe et son importance, enfin, la proximité de sources de polluants (station-service, trafic routier, etc.) (CERTU, 2003; Chocat et al., 2012). Ce risque est probablement l'un des enjeux de recherche majeurs pour favoriser et sécuriser la diffusion de l'utilisation des structures à revêtements perméables. Ce travail se limitant aux aspects quantitatif, cet aspect ne sera pas plus développé par la suite.
- **Le colmatage des structures perméables**. Cet aspect représente l'une des limites majeures de l'usage des revêtements perméables (Fletcher et al., 2013). En effet, le colmatage de la couche de surface par les particules et polluants contenus dans l'eau de ruissellement contribue à terme à réduire considérablement la perméabilité et donc la capacité de la couche de surface à absorber l'eau (Agouridis et al., 2011; Bean et Bidelspach, 2004; Hunt, 2011; Kamali et al., 2017; Nguyen, 2014). Des études montrent que la taille des particules est le paramètre qui influence le plus le colmatage (Lin et al., 2016; Nguyen, 2014). En fonction du diamètre des particules, le colmatage peut intervenir dans les premiers centimètres de la structure (Lin et al., 2016) ou en bas de la couche de surface (Coleri et al., 2013). D'autres travaux soulignent l'importance de la localisation de l'ouvrage et des conditions locales sur le colmatage (Kamali et al., 2017). Par ailleurs, différents auteurs montrent qu'un bon dimensionnement (notamment de la porosité de la couche de surface) et surtout qu'une maintenance adaptée permettent de réduire et de gérer ce risque de colmatage (Agouridis et al., 2011; Hunt, 2011; Lin et al., 2016). Il faut noter également que même s'il est important de lutter contre le colmatage par des actions de maintenance adaptées, l'existence de ce phénomène est le signe visible du rôle de filtration de la couche de surface. En effet, en piégeant les particules en suspension la structure piège aussi les polluants qui sont liés à ces particules, contribuant ainsi à filtrer l'eau qui entre dans la structure (Kamali et al., 2017).
- **La perturbation du sous-sol.** L'infiltration de l'eau peut être à proscrire en fonction de la nature du sol et du sous-sol pour éviter les phénomènes de gonflement/retrait (sols argileux) ou d'affaissement qui pourraient déstabiliser l'ouvrage et/ou les ouvrages à proximité (Bean et Bidelspach, 2004). Cette limite est liée au contexte géologique. Un usage de structures à revêtements perméables peut alors être envisagé à la condition d'empêcher l'infiltration par l'usage d'une membrane imperméable. Cette solution offre toujours certains avantages (stockage, évaporation) mais peut s'avérer inadaptée en fonction des volumes d'eau à gérer.

- **L'impact de la présence d'eau sur les propriétés mécaniques.** La gestion de l'eau dans une structure de voirie est un enjeu majeur. Le drainage est considéré comme l'un des éléments les plus importants pour le bon fonctionnement mécanique d'une voirie (Dawson, 2009). En effet, l'eau présente dans un milieu poreux réduit sa capacité de portance (Dawson, 2009). Traditionnellement, le drainage de l'eau dans la voirie a donc pour objectif de l'évacuer le plus vite possible (Liu, 2005). Dans le cas des structures à revêtements perméables, les enjeux hydrologiques amènent à favoriser à l'inverse le stockage de l'eau dans la couche de fondation. Pour éviter que ce stockage soit préjudiciable aux propriétés mécaniques de la structure, le stockage de l'eau doit s'effectuer seulement dans la partie basse de la fondation, souvent appelée sous-fondation (Beeldens et al., 2008).
- **Le risque de gel/dégel.** Ce risque est lié à la durabilité des propriétés de la couche de surface. En effet, des cycles de gel/dégel répétés vont endommager la structure et réduire ses performances mécaniques. Cet endommagement est encore plus marqué en présence d'eau dans la structure (Nguyen, 2014). Une conception adaptée (taux d'infiltration, granulométrie) permet de lutter efficacement contre ce risque en renforçant les matériaux de surface (Dawson, 2009). Ce risque est également à apprécier en fonction du climat local. À Caen par exemple, Météo France donne un nombre moyen de 14 jours de chute de neige et de 4 jours sans dégel par an, ce qui reste limité comparé à la résistance du béton perméable qui varie de 83 à 153 cycles de gel/dégel (Nguyen, 2014).
- **Le surcoût de ces structures.** Même si la question économique a été présentée précédemment comme un bénéfice, le surcoût direct lié aux matériaux et à la mise en œuvre des structures à revêtements perméables peut être un frein à leur utilisation (Barraud et al., 2010). En effet certains avantages économiques apportés par ces structures (réduction du coût de gestion du ruissellement et de la dépollution de l'eau, etc.) qui viennent compenser leur surcoût initial peuvent être difficiles à quantifier.
- **Les contraintes d'usages.** L'usage des revêtements perméables n'est pas adapté aux chaussées à fort trafic ou aux zones giratoires en raison de leurs propriétés mécaniques ou dans des zones sensibles à la pollution en raison du risque de diffusion des polluants, ce qui limite leur mise en œuvre (Barraud et al., 2010).

1.2.2.3 EXIGENCES ET BONNES PRATIQUES D'USAGE DES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Pour leur utilisation en voirie ou en aménagements publics, les structures à revêtements perméables doivent répondre à différentes exigences (Direction des routes et des transports, 2010; Faleyeux, 2015) : infiltration des eaux pluviales, tenue au trafic et durabilité, résistance aux sollicitations climatiques (résistance au gel-dégel), esthétisme (formes, couleurs, textures, végétalisation possible, etc.), intégration dans l'environnement et structuration de l'espace, facilité de mise en œuvre, facilité d'entretien, consommation en ressources et aptitude au recyclage, sécurité des utilisateurs (maîtrise de la glissance), accessibilité des personnes handicapées.

En réponse à ces exigences, pour maîtriser les risques liés aux revêtements perméables et pour optimiser leurs bénéfices, la littérature met en avant un certain nombre de « bonnes pratiques ». Elles permettent d'évaluer rapidement si l'environnement est adapté et guident la conception et la maintenance de ces ouvrages (Bean et Bidelspach, 2004; Grand Lyon, 2008a). Les principaux points sont présentés ci-dessous.

- **L'évaluation du site d'installation.** Cet aspect porte principalement sur le niveau de la nappe, la nature du sol, la topographie, l'environnement proche et les conditions climatiques locales (Abdo, 2007; Agouridis, et al., 2011; Faleyeux, 2015).
- **La conception.** Elle doit croiser dimensionnement hydraulique (Abdo, 2007; Agouridis, et al., 2011; Faleyeux, 2015) et mécanique (Abdo et Monfront, 2011). En raison de l'influence de la topographie, il est important d'avoir une vision en trois dimensions de la structure pour bien anticiper la circulation et le stockage de l'eau (Abdo, 2007).
- **La mise en œuvre.** Les bonnes pratiques concernent surtout ici les règles de poses liées à tous travaux de voirie (Abdo, 2007; Abdo et Monfront, 2011; Faleyeux, 2015).
- **La maintenance.** Les auteurs insistent notamment sur le rythme et le type de nettoyage à réaliser pour éviter le colmatage (Agouridis, et al., 2011; Bean et Hunt, 2007; Beeldens et al., 2008; Faleyeux, 2015).

1.2.3 ENJEUX DE RECHERCHE CONCERNANT LES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Les structures à revêtements perméables sont déjà largement étudiées dans la littérature comme cela a été montré précédemment. Cependant, de nombreux enjeux de recherches sur ces structures sont encore d'actualité et justifient l'intérêt actuel de nombreux scientifiques pour les revêtements perméables. Ces questions concernent par exemple l'impact des revêtements perméables sur la qualité de l'eau ou encore leur durabilité en lien notamment avec leur colmatage. Cette sous-section met l'accent sur trois de ces enjeux qui motivent ce travail de recherche, la diffusion de la mise en œuvre des revêtements perméables, la considération du bilan hydrologique global avec notamment la prise en compte de l'évaporation *via* ces structures et l'attention accordée à l'étude de leur localisation.

1.2.3.1 PASSER DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES À LA MISE EN ŒUVRE RÉELLE

Même si les bénéfices et les limites des structures à revêtements perméables ont été largement étudiés depuis le début des années 1990, ces structures restent un sujet d'étude majeur pour la communauté scientifique en hydrologie urbaine. Un des enjeux d'étude fort concerne l'utilisation pratique des structures à revêtements perméables dont les usages restent assez limités. En effet, il existe un décalage important entre les connaissances scientifiques sur ces structures et leur utilisation réelle sur le terrain. Cet enjeu du passage à la mise en œuvre concrète s'explique en partie par le manque d'outils de modélisation pour favoriser cette diffusion de l'usage des revêtements perméables comme cela est souligné par différents auteurs (Brunetti et al., 2016; Fletcher et al., 2013; Salvadore et al., 2015), et sera détaillé dans la sous-section 1.3.2. Ce manque d'outils et le manque de déploiement sur le terrain s'accompagnent d'une difficulté à quantifier les bénéfices apportés par ces structures. Il peut être alors plus confortable pour les aménageurs de privilégier les techniques traditionnelles pour lesquelles des guides et des méthodes de dimensionnement permettent de prédire les performances.

Le manque d'outil n'est pas la seule limite à la diffusion de l'usage des revêtements perméables. Comme cela a déjà été souligné à plusieurs reprises, l'amélioration de la gestion de l'assainissement urbain nécessite de poser autrement le problème de la gestion des eaux pluviales, de sortir du *« on a toujours fait comme ça »*. Pour cela, il est nécessaire de repenser l'organisation et la gouvernance des services techniques (en particulier ceux des collectivités),

du financement et des relations entre acteurs de l'urbanisme et acteurs de l'assainissement (Bertrand-Krajewski, 2006; Chocat, 2009).

La recherche, dans le prolongement de son rôle de production de nouvelles connaissances scientifiques, se doit donc d'accompagner la diffusion et la valorisation des bonnes pratiques et usages. En plus des publications purement scientifiques, cet accompagnement passe par un investissement auprès des aménageurs et décideurs et par des actions de médiations scientifiques pour faire évoluer les représentations sociales. Les différentes actions et productions du GRAIE, à Lyon, ou l'implication de la ville de Douai à l'origine de l'association ADOPTA en sont de beaux exemples et ont largement inspiré ce travail de recherche.

1.2.3.2 CONSIDÉRER ET OPTIMISER L'ÉVAPORATION *VIA* LES SURFACES PERMÉABLES

L'évaporation représente la majeure partie du bilan hydrologique d'un milieu naturel. Entre 60 % et 95 % de la pluie annuelle est évaporée pour un bassin versant forestier (Fletcher et al., 2013). Même si l'importance de l'évapotranspiration en milieu urbain est souvent minimisée (Salvadore et al., 2015), certaines études ont démontré que l'évaporation n'est pas négligeable, même pour des surfaces imperméables (Berthier et al., 2006; Ramier et al., 2011; Rodriguez et al., 2008). Cette minimisation du rôle de l'évaporation est particulièrement vraie concernant l'étude des revêtements perméables. Comme le souligne GOBEL, jusqu'à récemment, l'objectif principal dans l'étude des structures à revêtements perméables était d'avoir la meilleure perméabilité pour infiltrer au maximum les eaux pluviales (Göbel, Strake, Meber et al., 2013).

Certaines études sur ces structures présentent les bilans hydrologiques en termes de ruissellement, d'infiltration et de stockage mais ne mentionnent pas l'évaporation. Or plusieurs travaux montrent que les revêtements perméables peuvent permettre d'atteindre des taux d'évaporation intéressants (Brown et Borst, 2015). Jusqu'à 19 % de la pluie annuelle avec une surface en béton drainant et jusqu'à 65 % de la pluie annuelle avec un revêtement enherbé (Göbel, Strake, Voss et al., 2013). Des études soulignent également le lien entre le taux d'évaporation et la porosité de la couche de surface des revêtements perméables, une formulation adaptée de ces matériaux pourrait donc permettre d'optimiser cette évaporation (Göbel, Strake, Meber et al., 2013; Li et al., 2014). Pour approfondir cette question, FLETCHER souligne le besoin de développer de nouvelles méthodes de mesure de l'évaporation (Fletcher et al., 2013).

La prise en compte du bilan hydrique global est d'autant plus importante que l'évaporation favorise la régulation du climat urbain (Chocat, 2009). En effet, comme mentionné précédemment, le processus d'évaporation s'accompagne d'une consommation de chaleur, ce qui a pour effet de diminuer la température et permet ainsi de lutter contre le phénomène d'îlot de chaleur mentionné comme l'un des défis majeurs des villes (Salvadore et al., 2015). La prise en compte et surtout l'étude des structures à revêtements perméables, dans le but d'en optimiser l'évaporation, est donc un enjeu de recherche majeur (Göbel, Strake, Voss et al., 2013; H. Li et al., 2014). Cet aspect dépasse malheureusement le cadre du travail de cette thèse, mais une attention particulière sera donnée à la prise en compte de l'évaporation au même titre que les autres processus hydrologiques dans tous les modèles développés.

1.2.3.3 VEILLER À LA PRISE EN COMPTE SPÉCIFIQUE DES SITES

JAYASURIYA et KADURUPOKUNE soulignent que la conception et l'application des revêtements perméables doivent être propres à chaque site. Pour ces auteurs, l'adaptation de ces techniques aux conditions locales est un enjeu de recherche aussi important que l'étude des revêtements en eux-mêmes (Jayasuriya et Kadurupokune, 2008). Cet enjeu vient souligner qu'il n'est pas souhaitable de continuer de raisonner à partir de normes qui seraient appliquées de manière généralisée, comme cela a pu être le cas en France avec la circulaire CAQUOT (1.1.1.3) mais qu'au contraire, chaque projet doit s'appuyer sur un diagnostic local pour retenir une solution qui ne soit pas choisie *a priori*. Dans ce sens, l'étude de l'influence respective des paramètres de conception et des paramètres du site sur les processus hydrologiques et les performances des structures à revêtements perméables peut permettre de proposer un dimensionnement adapté au contexte local qui optimise le fonctionnement de ces structures. Inversement, une conception « générique » des structures à revêtements perméables pourrait entraîner des effets non souhaités comme la pollution d'une nappe ou une détérioration rapide de l'ouvrage.

PETRUCCI souligne quant à lui que la prise en compte du site doit s'accompagner de l'étude des spécificités du bassin versant. Sa thèse montre par exemple comment la mise en place sur l'ensemble d'un bassin versant de techniques alternatives visant à stocker l'eau et à la délivrer vers les réseaux à débits régulés, démarche largement plébiscitée dans les guides actuels, peut engendrer une augmentation des débits à l'exutoire en raison de l'addition des contributions individuelles (Petrucci, 2012).

Aussi, malgré les nombreux bénéfices *a priori* des techniques dites alternatives et l'objectif de ce travail qui vise à promouvoir l'utilisation des revêtements perméables, il convient de considérer les résultats obtenus dans ce travail à la lumière des spécificités des sites d'études pour éviter la tentation d'une généralisation hâtive.

SECTION 1.3

1.3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

PRÉAMBULE

La modélisation des processus hydrologiques et notamment des écoulements en milieu poreux repose sur les théories scientifiques qui permettent de décrire les états énergétiques et les mouvements de l'eau dans les milieux poreux. Ces notions sont considérées comme acquises par le lecteur qui pourra se reporter à l'annexe A – L'eau dans les milieux poreux, pour trouver une synthèse des notions scientifiques utilisées dans ce travail. Cette annexe présente également certains choix de notations ou certaines hypothèses prises dans le cadre du développement du modèle PermetAble (Chapitre 3).

1.3.1 LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE EN HYDROLOGIE URBAINE

Si de nombreuses études peuvent être réalisées en laboratoire ou *via* des sites expérimentaux (*in situ*), la recherche en hydrologie urbaine s'appuie également sur des outils de modélisation informatique. Les modèles ont l'avantage de permettre de tester un grand nombre de paramètres ou encore d'étudier différents scénarios d'aménagement à l'échelle d'un bassin versant. En raison de ses différents avantages la modélisation informatique est largement utilisée en hydrologie urbaine, avec une grande variété de finalités et d'approches différentes en fonction des modèles. Ces modèles peuvent être particulièrement utiles mais leur pertinence doit toujours être questionnée. Cette sous-section présente succinctement les différents aspects de la construction d'un modèle et la grande variété des modèles existants.

1.3.1.1 LA QUALITÉ ET LA PERTINENCE DE LA MODÉLISATION

Lors de sa *Keynote* à l'ICUD 2017, Wolfgang RAUCH citait un statisticien en disant *« Tous les modèles sont faux, quelques-uns sont utiles »*. Cette vérité semble primordiale à rappeler ici. Un modèle, même de très bonne qualité, donnera une représentation de la réalité qui comportera toujours une part d'erreur. Ces erreurs peuvent provenir de différentes sources (Roche et al., 2012) : le modèle lui-même (hypothèses, constructions, équations, etc.), les paramètres du calage, les données d'entrée, etc.

Pour faire face à cette réalité, il est nécessaire de mettre en place des indicateurs pour évaluer la qualité du modèle utilisé. Les indicateurs généralement utilisés sont : l'absence de biais, la précision, la sensibilité et la robustesse du modèle (CERTU, 2003). Il est également nécessaire de bien poser la question à laquelle le modèle doit apporter une réponse et de limiter l'interprétation des résultats du modèle à ce qu'il permet d'étudier. La question de la qualité du modèle est ainsi dépendante de chaque étape de son élaboration, depuis le choix du modèle jusqu'à son exploitation. Concernant l'étape du choix du modèle, ROCHE retient comme éléments clefs ; la finalité, les données disponibles et la réalité physique de terrain (Roche et al., 2012). Viennent ensuite les différentes étapes de mise en œuvre du modèle choisi : la collecte des données, le traitement de ces données, la construction du modèle, le calage du modèle à l'aide de donnés réelles, la vérification du modèle calé à partir d'un jeu de données différentes et enfin l'utilisation (l'exploitation) du modèle.

1.3.1.2 L'IMPORTANCE DE L'OBJECTIF DU MODÈLE

Le premier élément à considérer avant tout travail de modélisation est la définition de son objectif. Il n'existe pas de modèle universel, la modélisation doit partir du besoin (Roche et al., 2012). En effet le modèle ne sera pas construit de la même façon si l'élément recherché est de donner une représentation du fonctionnement du système (modèle cognitif) ou s'il s'agit de prévoir son fonctionnement (modèle prévisionnel). Différents objectifs peuvent ainsi être distingués (CERTU, 2003) :

- **les modèles cognitifs.** Objectif, donner une représentation du fonctionnement ou de l'état du système ;
- **les modèles prévisionnels.** Objectif, prévoir le fonctionnement ou l'état d'un système ;
- **les modèles décisionnels.** Qu'ils aient une finalité d'optimisation, d'aide à la conception ou de résolution du problème inverse, leur objectif est de déterminer quels sont les paramètres de contrôle (variables de conception) à fournir pour atteindre un objectif donné dans un contexte particulier ;
- **les modèles normatifs.** Objectif, donner une représentation d'un système à créer ou d'un processus.

L'utilité du modèle sera jugée au regard de sa capacité à répondre à l'objectif fixé. Ainsi, un modèle peut donner une représentation erronée de la réalité (tous donnent une représentation erronée puisque aucun n'est exact), mais permet d'apporter des informations utiles pour la réponse à l'objectif fixé.

1.3.1.3 LES DIFFÉRENTES APPROCHES DE MODÉLISATION

La modélisation regroupe un éventail très large de réalités, de ce fait différentes classifications existent dans la littérature (Baud, 2008). Dans le contexte de la modélisation hydrologique, les classifications les plus courantes consistent à distinguer les modèles selon qu'ils sont globaux ou distribués, continus ou basés sur un évènement, ou encore selon qu'ils sont empiriques, physiques ou conceptuels (Petrucci, 2012; Roche et al., 2012).

- **Modèles à base physique, empirique ou conceptuels.** Ces termes renvoient à la façon dont le modèle va chercher à représenter la réalité. Les modèles à base physique (Roche et al., 2012) cherchent à exprimer par des lois physiques les processus hydrologiques et hydrauliques. Ces modèles peuvent être basés par exemple sur la loi de DARCY généralisée (équation de RICHARDS) pour les écoulements dans le sol, ou sur l'équation de BARRÉ-SAINT-VENANT pour les écoulements en surface (Cosandey et Robinson, 2000; Hingray et al., 2009). Les modèles empiriques sont construits à partir de données d'observations ou d'expériences. Ils sont souvent considérés comme des « boîtes noires » (Hingray et al., 2009). Les modèles conceptuels sont construits sur une représentation conceptualisée des processus physiques (Roche et al., 2012) comme l'utilisation de réservoirs successifs pour représenter les processus hydrologiques dans le sol.
- **Modèles globaux ou distribués.** Cette distinction renvoie au niveau de décomposition du point de vue spatial et du point de vue des processus. Les modèles globaux visent à appréhender le phénomène étudié dans son ensemble, sans décomposition. D'après le CERTU, les modèles globaux sont réservés à de petits bassins versants pour lesquels les enjeux ne sont pas trop importants (CERTU, 2003). Contrairement aux premiers, les

modèles distribués visent à décomposer les phénomènes d'un point de vue spatial en découpant l'espace en sous-éléments (avec une résolution plus au moins fine) ainsi qu'à décomposer les processus étudiés en sous-phénomènes appliqués à chacun des sous-éléments de l'espace (CERTU, 2003; Roche et al., 2012).

- **Modèles continus ou basés sur un évènement.** Les modèles basés sur un évènement simulent le comportement hydrologique le temps d'un évènement pluvieux et de son drainage. Ils sont généralement utilisés pour la conception ou le dimensionnement des ouvrages. Ils permettent également d'explorer différents scénarios de réponse d'un bassin versant à un évènement d'une période de retour donnée. Les modèles continus utilisent des séries de pluies, historiques ou synthétiques, pour représenter le comportement sur la durée avec la succession de périodes sèches et pluvieuses. Ils ont de nombreuses applications possibles (Fletcher et al., 2013). Cette prise en considération de longues périodes est notamment particulièrement importante afin de mieux modéliser l'interface sol-atmosphère (Andrieu et al., 2008).

1.3.1.4 UNE TRÈS GRANDE VARIÉTÉ DE LOGICIELS HYDROLOGIQUES EXISTANTS

De très nombreux logiciels ont été développés en hydrologie urbaine ces dernières décennies. Ils s'inscrivent dans les différents types de modélisations présentés précédemment avec des objets, des échelles et des objectifs de modélisation très variés. Quelques auteurs ont entrepris d'étudier les différents modèles qui existent en hydrologie urbaine (Mitchell et al., 2007a; Salvadore et al., 2015; Zhou, 2014). Les apports de ces auteurs, et de bien d'autres, permettent de se faire une idée des atouts et limites des différents logiciels disponibles. Ils montrent également qu'il n'existe pas de « standardisation » des pratiques mais au contraire qu'un nombre important de modèles et d'approches coexistent. SALVADORE propose ainsi une classification des modèles en fonction de leurs objectifs et retient sept types principaux avec leurs caractéristiques et leur limites (Salvadore et al., 2015). Ces états des lieux des modèles en hydrologie urbaine mettent en évidence que les principaux modèles regroupés sous la dénomination de « modèle d'hydrologie urbaine » sont pertinents en terme d'estimation des flux dans les réseaux, à la fois quantitativement et qualitativement, mais que la description des processus hydrologiques qu'ils proposent est généralement simplifiée (Salvadore et al., 2015). Différents auteurs soulignent également que peu de modèles sont capables d'intégrer les différents processus hydrologiques avec une résolution spatiale et temporelle fine (Fletcher et al., 2013; Mitchell et al., 2007b). Ces questions des échelles de modélisation et de la complexité et la précision des modèles seront reprises dans la sous-section suivante.

Dans le cadre de ce travail deux échelles d'étude sont à envisager. L'échelle d'une structure à revêtements perméables où il s'agit de modéliser l'écoulement de l'eau à l'intérieur de la structure. L'échelle du bassin versant urbain où la question est d'étudier les impacts de la mise en œuvre de structures à revêtements perméables sur les ruissellements urbains. Peu de modèles permettent d'étudier avec précision ces deux échelles de façon couplée. Concernant la modélisation des écoulements de l'eau dans un milieu poreux, le modèle le plus célèbre et le plus utilisé est probablement le modèle HYDRUS (1D , 2D ou 3D), distribué par PC-Progress (Brunetti et al., 2016; Carbone et al., 2015; Illgen et al., 2007; Malet, 2003). Concernant la modélisation à l'échelle du bassin versant, le modèle le plus largement diffusé et utilisé dans la littérature est le modèle SWWM développé par l'EPA (Braud et al., 2013; Petrucci, 2012; Zhou, 2014). Ce modèle est en accès libre et son code a servi de base pour la construction de nombreux autres modèles comme Multi-Hydro (Gires, 2012) ou PCSWWM (Braud et al., 2013).

1.3.2 LES ENJEUX DE LA MODÉLISATION DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

La modélisation en hydrologie urbaine est en constante évolution pour répondre aux défauts et limites des modèles. La majorité des enjeux de la modélisation en hydrologie urbaine et des solutions actuelles ou à venir pour y répondre est résumée par la Figure 1.11 tirée d'une étude de SALVADORE (Salvadore et al., 2015). Cette sous-section développe quelques-uns de ces enjeux, avec le prisme spécifique de la modélisation des revêtements perméables.

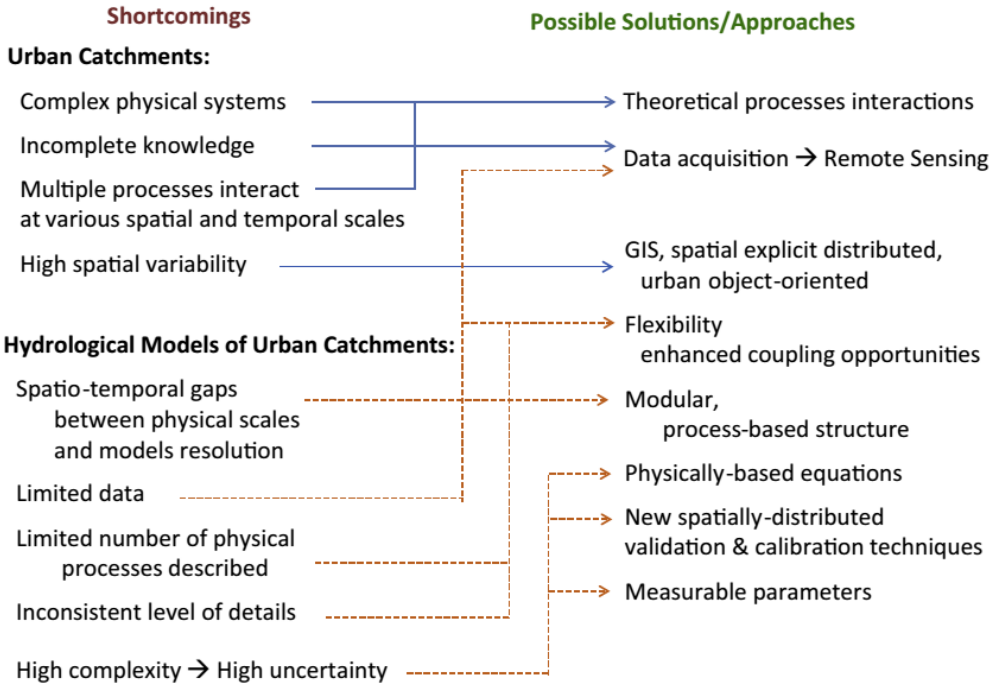


Figure 1.11 - Conclusions du travail de SALVADORE sur les enjeux de la modélisation en hydrologie urbaine. Les limites identifiées sont reliées à leurs solutions actuelles ou à développer (Salvadore et al., 2015)

1.3.2.1 AMÉLIORER LA DIFFUSION DE LA MODÉLISATION DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES TOUT EN MAÎTRISANT L'INCERTITUDE DES MODÈLE

Comme mentionné précédemment, un écart important existe entre les connaissances scientifiques sur les revêtements perméables et leur utilisation en pratique. Une des explications qui peut être avancée est le manque de modèles fiables et facilement utilisables pour la modélisation des processus hydrologiques en jeu dans ces structures.

Des modèles conceptuels, empiriques ou physiques ont été largement développés et étudiés dans la littérature et donnent déjà des résultats importants sur le comportement et les bénéfices des structures perméables. Cependant, il reste nécessaire de proposer des modèles capables de modéliser l'ensemble des processus hydrologiques en jeu dans ces structures, tels que les flux d'eau en condition non saturée, l'évaporation, l'infiltration, le drainage (Elliott et Trowsdale, 2007). Dans cette optique, de nombreuses études ont démontré que les modèles à base physique peuvent apporter une description fidèle de ces processus (Brunetti et al., 2017). Un des modèles à base physique le plus largement répandu, le logiciel HYDRUS, est largement utilisé dans la littérature pour la modélisation des écoulements dans les revêtements perméables (Brunetti et al., 2016; Camporese et al., 2013; Illgen et al., 2007) ou dans les toitures végétalisées (Y. Li et Babcock, 2015). Cependant, les modèles à base physique requièrent un nombre important de paramètres, indispensables pour leur construction, dont l'estimation est souvent difficile. Ils

sont le plus souvent ajustés lors d'une étape de calage puis confirmés par une étape de vérification. Ces étapes ont rapidement un coût en données et en temps de calcul important ce qui complique l'utilisation de ces modèles et leur fiabilité (Brunetti et al., 2016).

Au-delà de la modélisation des revêtements perméables, l'estimation des paramètres est un enjeu majeur pour l'ensemble des modèles en hydrologie urbaine. Comme le souligne SALVADORE dans son état de l'art de la modélisation, les modèles pour la modélisation urbaine sont plus complexes que les modèles en hydrologie classique. Ils doivent représenter bien plus de phénomènes à une résolution spatiale et temporelle plus fine. Le nombre de paramètres et de données nécessaires augmentent donc significativement ce qui a des conséquences sur la fiabilité de ces modèles (Salvadore et al., 2015). Plusieurs approches sont utilisées dans la littérature pour gérer cette complexité des paramètres utilisés dans les modèles.

- **La réduction du nombre de paramètres.** La démarche est de réduire le nombre de paramètres à calibrer par une étude d'analyse de sensibilité. Les paramètres les plus influents sont ainsi identifiés et retenus pour les étapes de calage et vérification (Salvadore et al., 2015).
- **La démarche de calage/vérification.** Probablement la méthode la plus couramment utilisée pour fixer les paramètres d'un modèle. L'étape de calage du modèle repose sur la mise en place d'une fonction numérique, appelée critère, pour mesurer l'écart entre les résultats modélisés et les données réelles. Le principe du calage consiste ensuite à minimiser l'écart en ajustant les paramètres du modèle (CERTU, 2003). Ces paramètres sont ensuite éprouvés par la vérification du modèle à l'aide d'un second jeu de données. Différents auteurs ont développé de nombreuses méthodes pour optimiser l'étape de calage et en réduire le coût de calcul nécessaire (Brunetti et al., 2017).
- **La définition des paramètres à partir de valeurs réelles, physiquement mesurables.** Comme les modèles dits « à base physique » sont construits sur une représentation de processus réels, beaucoup de leurs paramètres peuvent être définis à partir de grandeurs qui ont un sens physique. Cette approche a de nombreux avantages notamment le fait que ces paramètres physiques peuvent être mesurés expérimentalement ou déterminés dans la littérature ce qui fait d'eux non plus des paramètres à caler mais des données d'entrée. Ces paramètres ont également une plage de valeurs réalistes ce qui limite le champ de leurs valeurs possibles.

Malgré ces méthodes d'estimation des paramètres, intégrer les différentes composantes de l'hydrologie urbaine à différentes échelles conduit à la formation de modèles complexes, difficiles à utiliser en raison de la quantité de données nécessaires et dont il peut être difficile d'évaluer la fiabilité (Fletcher et al., 2013). Pour estimer la précision des modèles et surtout tenir compte de leurs incertitudes, le comité commun sur l'assainissement urbain de l'association internationale de l'eau (IWA) et de l'association internationale de recherche hydraulique (IAHR) recommande l'utilisation d'une démarche d'analyse de sensibilité systématique des modèles. Cette analyse est basée sur la définition pour chaque paramètre d'une plage de valeurs réalistes qui est ensuite propagée dans le modèle pour obtenir une plage de résultats potentiels (Fletcher et al., 2013). La difficulté d'aller jusqu'au bout d'un processus de maîtrise et d'estimation de l'incertitude des modèles est un des facteurs qui limite leur utilisation et par conséquent la diffusion des approches alternatives dont il est difficile de quantifier les résultats.

Au regard des enjeux mentionnés ci-dessus, de nombreux modèles se retrouvent réservés à des spécialistes et ne peuvent être utilisés qu'après de longues et coûteuses campagnes d'acquisition

de données ce qui contribue également à limiter la diffusion des pratiques alternatives. Pour généraliser l'utilisation des modèles, il semble donc important qu'ils puissent fonctionner avec un nombre réduit de paramètres qui soient faciles à déterminer (Illgen et al., 2007). SALVADORE rappelle que la complexité des processus physiques décrits par un modèle doit refléter l'objectif de modélisation (Salvadore et al., 2015). Dans le cas d'un objectif précis, il convient donc d'éviter de sur-complexifier le modèle mais de trouver le niveau de détail adapté à l'objectif visé.

1.3.2.2 MODÉLISER LES PROCESSUS HYDROLOGIQUES DES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES DANS UNE APPROCHE SPATIALISÉE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Afin de pouvoir étudier les processus hydrologiques et quantifier les bénéfices des revêtements perméables, la question de la « bonne » échelle de modélisation se pose. S'il n'y a pas une seule échelle pertinente pour caractériser les revêtements perméables, il semble que l'échelle du bassin versant (d'une dizaine à une centaine d'hectares) soit à privilégier (Krebs et al., 2014; Petrucci, 2012; Tassin et al., 2003). En milieu urbain, ce raisonnement en terme de bassin versant peut être rendu compliqué par l'existence des réseaux urbains (Petrucci, 2012). En effet, ils peuvent modifier fortement les délimitations naturelles des bassins versants, obligeant pour avoir une vision complète des écoulements à prendre en considération une zone plus étendue. Ceci impacte également la modélisation des flux qui se fait généralement par le couplage d'un modèle de surface (2D) et d'un modèle d'écoulement en réseau (1D) (Krebs et al., 2014; Salvadore et al., 2015).

Pour étudier les bénéfices des structures à revêtements perméables à l'échelle du bassin versant, il apparaît nécessaire de pouvoir, d'une part bien modéliser les processus hydrologiques induits par ces structures, et d'autre part les intégrer dans une modélisation spatialisée. Des modèles spatialisés, souvent complexes et basés sur une approche physique des écoulements de surface et en réseau tel que MIKE-URBAN, existent mais sont généralement inadaptés pour représenter les processus liés aux techniques alternatives telles que les revêtements perméables (Mitchell et al., 2007b; Salvadore et al., 2015). D'autres modèles permettent de bien représenter les processus hydrologiques induits par les techniques alternatives (par une approche conceptuelle à l'échelle du bassin versant tel que le modèle MUSIC ou par une approche physique à l'échelle de la structure tel que le modèle HYDRUS), mais ne permettent pas d'intégrer ces effets de façon spatialisée à l'échelle d'un bassin versant. Il existe encore un écart important entre ces différentes approches et échelles (Fletcher et al., 2013). Aussi, un des enjeux de modélisation est d'être capable de prendre en compte la ville dans toute sa complexité en considérant à la fois les phénomènes localisés (processus hydrologiques au sein des structures perméables par exemple) et les effets d'ensemble (réduction du ruissellement d'ensemble par exemple) (Andrieu et al., 2008; Gires, 2012; Krebs et al., 2014).

Le développement de tels modèles pose la question du niveau de qualité et de résolution requis puisque les données spatiales vont directement impacter la qualité des résultats du modèle (Yu et Coulthard, 2015). GIRES, avec l'utilisation des multi-fractales, souligne ainsi comment le changement de résolution spatiale modifie les résultats de la modélisation (Gires, 2012). Cette question rejoint le point précédent sur la complexité des modèles et sera reprise à la sous-section 1.3.2.4 sur l'utilisation des systèmes d'informations géographiques.

1.3.2.3 MIEUX DÉFINIR LA GÉNÉRATION DU RUISSELLEMENT DE SURFACE DANS LES MODÈLES HYDROLOGIQUES, NOTAMMENT POUR LES ÉVÈNEMENTS PLUVIEUX COURANTS

Dans les modèles d'hydrologie urbaine, la génération du ruissellement est majoritairement déduite des surfaces imperméables pour lesquelles l'infiltration et l'évaporation sont considérées comme très faibles. Inversement, les surfaces perméables (espaces verts, jardins, etc.) sont souvent soit ignorées soit peu prises en considération dans la génération du ruissellement. Or, de nombreuses études (Ragab et al., 2003; Ramier et al., 2011) ont montré que l'infiltration et surtout que l'évaporation peuvent représenter une part importante des processus hydrologiques des surfaces imperméables ; 6 % à 9 % et 21 % à 24 % de la pluie annuelle sont respectivement infiltrés et évaporées d'après RAGAB (Ragab et al., 2003). Concernant les surfaces perméables, un débat existe entre des auteurs qui observent une contribution très faible de ces surfaces au ruissellement urbain, et d'autres qui défendent la position inverse (Fletcher et al., 2013).

Cette définition fine de la génération du ruissellement est d'autant plus importante pour la modélisation des évènements pluvieux courants. En effet, dans le cas des événements exceptionnels, l'interception initiale a moins d'influence au vu des volumes précipités (Salvadore et al., 2015). De plus, la saturation en eau et/ou le développement de la croûte de battance des sols naturels non imperméables donnent lieu à des volumes ruisselés qui tendent vers ceux des sols imperméables. Ce n'est pas le cas pour les événements pluvieux courants où un changement des propriétés d'interception ou d'infiltration du sol entraîne des modifications du ruissellement très marquées (Bertrand-Krajewski, 2006). L'enjeu des modifications du ruissellement en ville n'est donc pas seulement dans la gestion des événements exceptionnels mais également dans la gestion des événements courants pour lesquels l'imperméabilisation de la ville provoque un ruissellement sensible là où aucun ruissellement n'était observé en conditions naturelles (Petrucci, 2012).

1.3.2.4 PROFITER DU DÉVELOPPEMENT ET DES POSSIBILITÉS OFFERTES PAR LES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG)

Les points précédents posent la question de l'accès à une donnée fiable pour définir l'occupation du sol. L'occupation du sol en milieu urbain est généralement définie à partir de photographies aériennes et d'algorithmes de traitement (photogrammétries) ou d'un traitement humain. Ces procédés peuvent conduire à des erreurs importantes (Salvadore et al., 2015). Les évolutions et la généralisation de l'usage des SIG (systèmes d'information géographique) par les collectivités et acteurs territoriaux ainsi que le développement de nouvelles techniques d'acquisitions de données (LIDAR) représentent une réelle opportunité (Chen et al., 2009). La généralisation de leur utilisation permet de profiter du niveau de détails auxquels ces systèmes donnent accès en les couplant avec des modèles hydrologiques. Les modèles SIG sont ainsi largement utilisés pour la gestion des données et de plus en plus comme support des logiciels de modélisation en hydrologie urbaine (Salvadore et al., 2015). Les modèles basés sur un SIG peuvent être à base physique ou conceptuelle comme le modèle GUFIM développé pour la modélisation d'inondations soudaines en l'absence de données hydrauliques détaillées (Chen et al., 2009). Les perspectives offertes par de tels modèles sont intéressantes compte tenu de l'enjeu de limiter la complexité des modèles comme cela a été souligné précédemment.

Ces supports de données permettent également d'améliorer l'analyse des données. À partir de données SIG, il est possible par exemple de mettre en place des algorithmes de classification

cartographique pour rapidement identifier des zones ou phénomènes intéressants (Fressard, 2006). Cette logique a été utilisée par BRETON pour identifier les emplacements à favoriser pour l'implantation de techniques alternatives dans le but de lutter contre le risque d'inondation (Breton et al., 2013).

1.3.3 UNE PROBLÉMATIQUE DÉCLINÉE EN DEUX ÉTAPES

La littérature sur la modélisation en hydrologie urbaine souligne l'importance de l'adéquation du modèle aux objectifs de recherche. Afin de répondre de façon pertinente à l'objectif de ce travail, la quantification des bénéfices des structures à revêtements perméables sur le ruissellement urbain, il a été choisi de le décliner en deux étapes. Dans un premier temps, quantifier les processus hydrologiques au sein des revêtements perméables à l'échelle de la structure. Dans un second temps, en s'appuyant sur les résultats précédents, quantifier les bénéfices de ces structures sur le ruissellement de surface à l'échelle d'un bassin versant. Chacun de ces objectifs impliquant une échelle et un type de modélisation bien différent, il a été choisi de développer deux modèles. Cette sous-section détaille ce choix et les types de modèles retenus.

1.3.3.1 CHOIX D'UNE DOUBLE MODÉLISATION

Comme cela a été souligné précédemment (1.3.2.2), l'un des enjeux majeurs pour la modélisation en hydrologie urbaine est d'arriver à représenter les phénomènes d'ensemble à l'échelle du bassin versant tout en modélisant fidèlement les processus hydrologiques localisés, notamment ceux à l'œuvre au sein des différentes techniques alternatives (Andrieu et al., 2008; Gires, 2012; Krebs et al., 2014). Cet enjeu s'applique directement à l'objectif de ce travail. En effet pour quantifier des impacts sur le ruissellement de surface, il faut pouvoir représenter ce phénomène dans son ensemble à l'échelle du bassin versant. En même temps, pour quantifier l'impact des revêtements perméables sur le ruissellement, il est nécessaire de pouvoir représenter fidèlement les processus hydrologiques à l'œuvre dans ces structures. L'importance de lier ces deux échelles a été rappelée précédemment (1.3.2.2) tout en soulignant le risque que cela conduise à créer des modèles complexes nécessitant des données et un temps de calcul important.

D'un autre côté, l'objectif de cette thèse s'inscrit dans une démarche de diffusion de l'usage des revêtements perméables. Les enjeux d'accompagnement des acteurs et de vulgarisation des connaissances scientifiques, développés précédemment (1.2.3.1), ont une place toute particulière dans les motivations de ce travail. Dans cette démarche de diffusion des usages, le développement d'outils de modélisation semble pertinent et nécessaire comme cela a été rappelé aux sous-sections 1.2.3.1 et 1.3.2.1. Cependant, pour qu'un modèle soit pertinent et utilisable il est important qu'il puisse fonctionner avec un nombre réduit de paramètres qui soient faciles à déterminer (Illgen et al., 2007) et que la complexité des processus physiques décrits par ce modèle soit ajustée à l'objectif de modélisation (Salvadore et al., 2015) (1.3.2.1).

Au regard de ces deux enjeux, il n'a pas été jugé pertinent dans le cadre de ce travail de chercher à représenter dans un seul modèle l'ensemble des échelles et des processus, mais de décomposer ce travail en deux modèles, liés entre eux, avec chacun un niveau de complexité ajusté à leur objectif. Cette déclinaison de l'objectif global en deux étapes permet de s'appuyer et de valoriser au mieux les compétences respectives de chaque laboratoire (l'ESITC et le LETG).

1.3.3.2 CHOIX D'UNE APPROCHE À BASE PHYSIQUE POUR LA MODÉLISATION DES PROCESSUS HYDROLOGIQUE À L'ÉCHELLE DE LA STRUCTURE

La sous-section 1.3.2.1 a souligné que la modélisation fine des processus hydrologiques au sein des structures perméables est nécessaire pour améliorer la connaissance sur les performances de ces structures (Brunetti et al., 2016; Salvadore et al., 2015). La première étape de ce travail a justement pour objectif la quantification des processus hydrologiques au sein de ces structures. Pour cela le modèle retenu doit permettre de quantifier l'impact de chaque paramètre sur les processus hydrologiques. Au vu des éléments présentés précédemment (1.3.1 et 1.3.2), une approche distribuée et à base physique semble la plus adaptée (Salvadore et al., 2015). Ce type de modélisation a l'avantage de donner un sens physique aux paramètres du modèle et d'expliciter leur rôle dans la modélisation ce qui permet d'explorer l'influence de chacun sur les résultats. Il sera alors possible d'explorer l'impact du site, de la conception ou encore du type d'évènement sur le comportement de la structure.

L'inconvénient majeur de ce type de modèle réside dans l'estimation des paramètres et de leur éventuel calage. À partir des différentes approches présentées précédemment (1.3.2.1), il a été choisi de limiter au strict minimum les étapes de calage et de vérification en utilisant exclusivement des paramètres physiquement définissables et mesurables (Salvadore et al., 2015). Enfin, une modélisation en 2D voire 3D est nécessaire pour pouvoir rendre compte de paramètres tels que la largeur de la structure, sa pente ou encore le drainage d'une zone contributrice vers la structure.

Plusieurs logiciels ont été envisagés pour ce travail de modélisation. Compte tenu des critères énoncés ci-dessus, le modèle souhaité devait permettre de modéliser les flux d'eau à l'intérieur de la structure en résolvant l'équation de RICHARDS de façon explicite ; il devait aussi permettre de prendre en compte l'évaporation dont l'importance a été discutée précédemment (1.2.3.2). Au regard des objectifs de la modélisation différents logiciels ont été analysés (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 – Synthèse de la comparaison des logiciels de modélisation verticale

Objectifs	FlexPDE	FEFLOW	HYDRUS	MODFLOW	DRAINMOD
Modèle à base physique	Oui *Équations programmées par l'utilisateur*	Oui *Équations de RICHARDS et de convection-dispersion*	Oui *Équations de RICHARDS et de convection-dispersion*	Oui *Équation de DARCY*	Non *Modèle conceptuel*
Infiltration en milieu saturé et non saturé	Oui	Oui	Oui	Non – seulement en saturé	
Stockage et hauteur d'eau	Oui	Oui	Oui	Oui	
Drainage	Oui	Oui	Oui	Oui	
Flux thermique	Oui	Oui, dans certaines versions	Oui, dans certaines versions	Non	
Diffusion de polluant	Oui	Oui, dans certaines versions	Oui, dans certaines versions	Non	
Résistance mécanique	Oui	Non	Non	Non	

À partir d'une première sélection trois logiciels ont été retenus : FlexPDE, FEFLOW et HYDRUS. Les trois sont des logiciels propriétaires, ils sont distribués respectivement par PDE Solution, MIKE et PC-Progress. Le Tableau 1.2 affine la comparaison précédente pour ces trois logiciels.

Tableau 1.2 - Comparaison technico-économique des logiciels FlexPDE, FEFLOW et HYDRUS

Nom	OS	Prix[4]		Couplages / extensions	Publication[5]
FlexPDE	Windows MAC OS X INUX	Version étudiante gratuite 445 € 895 € 1 795 €	 1D 2D 3D	non	2070
FEFLOW	Windows	Version limitée gratuite 990 / 1990 € 2990 / 4990 / 6990 €	 2D 3D	Couplage avec MIKE 11 et MIKE SHE	5010
HYDRUS 2D/3D	Windows	1200/2400 € 1800/3600 €	2D 3D	De nombreux *add-on* existent. Couplage possible avec : MODFLOW, PHREEQC, Module des zones humides, et Rosetta	12200

Le logiciel HYDRUS 2D (ou 3D) est le plus largement utilisé dans la littérature pour des études similaires (Brunetti et al., 2016, 2017). Ce logiciel aurait pu tout à fait convenir et a été envisagé pendant un temps. Il a été finalement choisi de développer une modélisation « maison » à l'aide du logiciel FlexPDE, un environnement de résolution d'équations aux dérivées partielles qui a déjà été utilisé par différents auteurs pour modéliser les flux d'eau dans les milieux poreux (Liu, 2005; Pooneh Maghoul, 2012).

Ce choix s'appuie sur la volonté de maîtriser le nombre et la définition des paramètres utilisés pour éviter leur calage et de pouvoir prendre en compte l'évaporation de façon explicite. Initialement ce choix se justifiait également par la volonté de proposer une modélisation couplée Thermo-Hydraulique qui prenne en compte la température en plus de la pression interstitielle dans le but d'établir le bilan des flux d'eau sous la forme liquide et vapeur. Cette démarche visait à mieux quantifier le processus d'évaporation mais a été rapidement abandonnée, toujours pour veiller à trouver le juste niveau de complexité au regard des objectifs.

L'étape de développement du modèle a nécessité un investissement en temps qui aurait pu être évité en utilisant un logiciel comme HYDRUS. Cette démarche de développement a cependant permis de questionner les choix de modélisation et d'approfondir la compréhension des processus modélisés. La réponse à l'objectif « quantifier les processus hydrologiques au sein des structures à revêtements perméables » s'appuie ainsi à la fois sur les résultats obtenus grâce au modèle et sur les hypothèses et choix pris pendant la phase de développement du code. La construction de ce modèle, dénommé par la suite *PermetAble*, et les résultats obtenus sont présentés dans le 3ème chapitre.

1.3.3.3 Choix d'une approche conceptuelle pour la quantification des bénéfices à l'échelle du bassin versant

La seconde étape de ce travail a pour objectif de quantifier à l'échelle du bassin versant les impacts de l'usage des structures à revêtements perméables sur le ruissellement. Cet objectif peut se décliner en différentes questions : où placer les revêtements perméables pour qu'ils soient le plus efficaces ? Est-ce que leur impact est proportionnel à leur usage ou est-ce qu'un

[4] Prix TTC en janvier 2016 d'après les sites des éditeurs des logiciels.
[5] Nombre de réponses du moteur de recherche « Google Scholar » à partir du nom du logiciel, en janvier 2016.

effet seuil existe ? À quel point ces impacts sont dépendants des propriétés du bassin versant ? La réponse à ces questions peut passer par une quantification absolue du ruissellement ou une quantification relative de ce dernier (comparaison des résultats de différents scénarios). La deuxième approche a été préférée et une modélisation à base conceptuelle est retenue pour limiter la complexité du modèle et pallier l'absence de données hydrauliques détaillées (Chen et al., 2009).

Par ailleurs, il a rapidement été choisi de construire cette modélisation à l'échelle du bassin versant sur un SIG dont les avantages ont été présentés précédemment (1.3.2.4). Choix d'autant plus logique que l'environnement du LETG offrait toutes les ressources nécessaires pour la mise en place d'un SIG, en termes d'accès aux données, d'instrument de terrain et d'expertise logiciel. Avec l'usage d'un SIG il est possible de construire un modèle spatialisé avec une description fine de l'occupation du sol afin de décrire au mieux la génération du ruissellement.

Différents modèles conceptuels basés sur un SIG existent dans la littérature (Chen et al., 2009) et auraient pu être envisagés. Le choix s'est finalement porté sur l'utilisation de système multi-agents (SMA) avec à nouveau le développement d'un modèle, codé sous Netlogo et dénommé *PorousCity* par la suite.

L'idée de l'utilisation de Netlogo pour la modélisation des processus hydrologique à l'échelle du bassin versant trouve son origine dans les travaux de Romain REULIER, qui a réalisé sa thèse au LETG Caen (Reulier, 2015). Dans le cadre de ses travaux de thèse, il a développé et utilisé un modèle multi-agent pour étudier l'influence de la structure paysagère sur les dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires (Reulier et al., 2017). Le modèle est appliqué sur un bassin versant agricole du nord-ouest de la France. Le bassin versant est décrit par sa topographie et son occupation du sol, qui constituent des attributs des cellules. La pluie est ensuite générée en créant un certain nombre de « tortues », agent goutte d'eau, sur chaque cellule. Ces gouttes peuvent ensuite s'écouler en fonction, à la fois de la topographie, de l'occupation du sol et de la présence des autres gouttes sur les cellules.

Cette modélisation offre l'avantage de pouvoir suivre la trajectoire individuelle de chaque goutte, ce qui permet de calculer des indicateurs de connectivité du bassin versant en comptant le nombre de gouttes qui parviennent à atteindre l'exutoire et de mesurer l'influence de la structure paysagère sur les écoulements (haies, fossés, occupation des parcelles).

Les travaux de Romain Reulier sont eux même inspirés de trois utilisations antérieures des systèmes multi-agents appliquées aux processus de ruissellement de surface :

- les travaux de David SERVAT (Servat, 2000) et plus largement, ceux du projet RIVAGE (Ruissellement et Infiltration Vu par des AGEnts), initié par Edith PERRIER et Jean-Pierre TREUIL du laboratoire d'informatique de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) (Treuil et al., 2001). Ces travaux sont pionniers dans l'utilisation des SMA pour représenter les processus d'infiltration et de ruissellement avec une approche particulaire ;
- les travaux de Sim REANEY (Reaney et al., 2006), qui a développé une modélisation couplée entre un modèle hydrologique physique et distribué et des agents autonomes représentant des gouttes d'eau, afin notamment de représenter la connectivité des sources de ruissellement et les chemins d'écoulements de l'eau ;

- les travaux de Mahefa RAKATOARISOA (Rakatoarisoa et al., 2014), qui a travaillé sur un modèle multi-agent nécessitant un minimum de paramétrage, dans lesquels la modélisation de l'infiltration et du ruissellement sont dissociés en deux phases.

Les SMA offrent différents avantages : ils ne nécessitent pas beaucoup de données d'entrées et ils permettent de modéliser les dynamiques globales d'un système (ici le ruissellement à l'échelle du bassin versant) par la description de processus locaux et leurs interactions (ici les processus hydrologiques à l'échelle de la structure). Ils intègrent ainsi l'échelle globale et l'échelle locale ce qui est un des enjeux centraux de ce travail. Enfin, la modélisation à base d'agent est un vecteur de médiation intéressant, à l'image du projet LittoSIM qui utilise les possibilités offertes par les SMA pour la sensibilisation des élus à la protection contre les submersions marines suite à la tempête Xynthia (Becu et al., 2017). Sans prétendre aller jusqu'à la création d'un tel outil, l'usage de Netlogo dans le cadre de ce travail s'inscrit parfaitement dans la volonté de proposer un modèle simple et adapté à la sensibilisation des acteurs locaux.

1.3.4 UN ANCRAGE CONTEXTUEL ET RÉGIONAL

Un précédent projet, VECOP, conduit à l'ESITC a permis le développement d'une nouvelle formulation de béton drainant (Nguyen et al., 2014). Dans la continuité, le projet VECOPEXP a été monté par ce même laboratoire pour étudier les possibilités d'utilisation de ce béton drainant sous la forme de revêtements perméables, notamment *via* la réalisation de sites expérimentaux *in situ*. Ce travail de thèse s'est tenu en parallèle de ce second projet avec un intérêt particulier de la Région Normandie qui a financé cette thèse. Cette sous-section revient sur ce contexte, véritable atout pour ce travail, et présente le choix du terrain d'étude pour la modélisation spatialisée.

1.3.4.1 CHOIX DE LA CONFIGURATION DE MATÉRIAUX POUR MODÉLISER LA STRUCTURE

Ce travail de recherche ne se veut pas spécifique à un matériau ou une structure. La démarche de modélisation développée est théoriquement applicable à tout type de structure à revêtements perméables, quels qu'en soient les matériaux qui la composent. Il suffit en effet de pouvoir décrire ces différents matériaux avec les paramètres clefs nécessaires aux modèles (Chapitre 3 et Chapitre 4). Cependant, il a été choisi de se concentrer sur une seule configuration de matériaux dans le cadre de cette thèse. Ce choix s'explique au regard de l'importance de la description et caractérisation de chaque matériau utilisé pour la modélisation. Il vise à permettre d'explorer plus en détails les propriétés des matériaux et notamment celles des pavés en béton drainant coquillé (colmatage, évaporation). Ainsi, les simulations présentées dans ce travail, qu'elles concernent le développement des modèles ou leur exploitation, seront basées sur une seule configuration de matériaux dont le choix est détaillé ci-dessous.

- **La couche de surface.** Composée de pavés en béton drainant coquillé. Ce béton a été développé dans le cadre de la thèse de NGUYEN (Nguyen, 2014). Sa formulation a été optimisée pour atteindre des propriétés mécaniques et hydrauliques satisfaisantes pour un usage de parking ou de voirie légère. Avantages de ce matériau : ces propriétés sont particulièrement bien caractérisées et quantifiées dans le travail de NGUYEN (Chapitre 2), le laboratoire ESITC en possède suffisamment pour permettre son étude et son usage dans le cadre d'expériences en laboratoire et les deux sites expérimentaux étudiés (1.3.4.2) sont réalisés avec ces pavés. Enfin, ce béton a la particularité d'incorporer des coquilles recyclées dans sa formulation. La Normandie étant la première région conchylicole d'Europe ce

matériau s'inscrit dans une dynamique écologique régionale en offrant une valorisation à un déchet local tout en réduisant la consommation de graviers (Nguyen et al., 2013).

- **Le lit de pose et la fondation.** Ces deux couches sont composées respectivement de gravillons 2-6 mm qui correspondent aux matériaux utilisés sur les deux sites expérimentaux *in situ*. Choisis en suivant les principaux guides de dimensionnement (Abdo, 2007; Beeldens et al., 2008; CERIB, 2009; Faleyeux, 2015), ces matériaux correspondent à ceux utilisés classiquement pour ce type d'ouvrage.

1.3.4.2 CHOIX DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES POUR LA MODÉLISATION À L'ÉCHELLE DE LA STRUCTURE

Étant donné que la description fine des processus hydrologiques est un des points faibles des modèles actuels, le travail de modélisation se doit d'être particulièrement vigilant sur la description des processus et s'accompagner d'expériences en laboratoire et/ou d'observations sur le terrain pour en améliorer la compréhension et la modélisation.

Dans le cadre du projet VECOPEXP, deux sites *in situ* et un banc d'essai expérimental ont été réalisés et ont permis d'enrichir ce travail de thèse. L'un des deux sites d'expérimentation *in situ* étant situé sur le parking du laboratoire de l'ESITC, son observation régulière a été facilitée. Plusieurs mois de suivi, parallèlement au développement du modèle *PermetAble*, ont contribué à enrichir le travail de modélisation en l'ancrant dans le réel. La structure modélisée s'inspire ainsi largement de la structure réellement construite sur site, même si la temporalité du projet VECOPEXP n'a pas rendu possible l'obtention de données sur site qui auraient permis une confrontation intéressante des résultats modélisés à ceux *in situ*.

Cette confrontation du modèle à des données expérimentales s'est donc basée sur l'utilisation d'un banc d'essai en laboratoire. Ce dispositif et les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le chapitre 2. Les données des différentes expériences ont permis le calage puis la vérification du modèle *PermetAble*.

1.3.4.3 CHOIX D'UN SITE D'ÉTUDE RÉEL POUR LA MODÉLISATION À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Le passage à l'échelle du bassin versant avec le développement du modèle *PorousCity* aurait pu se faire sur un site synthétique, généré informatiquement à partir de paramètres comme une pente moyenne et des pourcentages d'occupation du sol. Dans le cadre de ce travail, il a été choisi de développer directement ce modèle en se basant sur un site réel situé à Ouistreham, en Normandie. Ce choix s'appuie sur plusieurs raisons développées ici.

- **Une finalité d'application régionale.** Cette thèse est financée par la Région Normandie qui regarde avec intérêt le développement des revêtements perméables. Aussi, l'application de la modélisation à un site normand a rapidement fait partie des finalités de ce travail. Plutôt que de développer un modèle pour un site synthétique avant de l'appliquer ensuite à un site réel, il a semblé plus adapté de travailler immédiatement sur des données réelles.
- **Valoriser les possibilités offertes par le SIG.** Comme évoqué précédemment le modèle *PorousCity* est construit à partir d'un SIG. Ce choix apporte de nombreux avantages qui ont été largement présentés. Par conséquent, l'un des critères pour la sélection du site portait sur la facilité d'obtenir des données cartographiques de qualité. Dans le cas de Ouistreham, la ville a été couverte par le projet Litto3D® qui a permis de produire un MNT de la façade

maritime *via* l'utilisation d'un LIDAR. Cette donnée de qualité a pu être utilisée dans le cadre de ce travail.

- **Favoriser la collaboration avec les aménageurs et collectivités.** Le travail sur un site réel permet le dialogue avec les acteurs locaux autour du travail de thèse ce qui contribue, d'une part à la diffusion des connaissances scientifiques sur les revêtements perméables, et d'autre part permet d'enrichir le travail de modélisation de l'expérience que les acteurs locaux ont du terrain d'étude. Cet aspect a été déterminant dans le choix du site d'étude à Ouistreham. En effet une excellente collaboration s'est développée avec la ville qui s'est particulièrement intéressée à ces techniques. Cette collaboration a facilité l'accès aux données de terrain et l'expérience que les acteurs locaux ont de la réponse du bassin versant aux évènements climatiques s'est avérée très précieuse pour la vérification du modèle (Chapitre 4).
- **Privilégier une modélisation simple et mieux définir la génération du ruissellement.** Pour prendre en compte ces deux enjeux développés précédemment, il a été choisi de privilégier un terrain d'étude présentant des processus hydrologiques simples. L'idée étant que le travail de modélisation puisse se concentrer prioritairement sur les modifications induites par l'ajout de revêtements perméables et non sur la modélisation de la complexité du bassin versant en lui-même. Le bassin versant choisi, le quartier de *Riva Bella*, présente plusieurs particularités qui simplifient la description des processus hydrologiques. Il ne possède aucun réseau de collecte des eaux pluviales, ce qui permet de se passer d'un couplage modèle de surface-modèle de réseau. Il est situé sur une dune composée de sable avec une perméabilité élevée et globalement uniforme sur l'ensemble du bassin ce qui simplifie la modélisation des processus d'infiltration. Enfin, c'est un quartier pavillonnaire avec une occupation du sol facile à décrire entre l'espace public, voirie, trottoirs, parkings et l'espace privé, maisons et jardins. Ces caractéristiques seront détaillées dans le chapitre 2.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce premier chapitre a permis de poser le contexte de ce travail et de présenter les enjeux scientifiques et environnementaux qui motivent cette thèse. La suite de ce travail s'appuie sur les connaissances présentées dans ce chapitre en essayant de tirer des enseignements des expériences précédentes. Aussi, en s'appuyant sur l'état de l'art présenté jusqu'ici, trois principes ont été définis. Ces partis-pris visent d'une part à donner un cadre et une orientation à ce travail, d'autre part à l'inscrire dans une démarche résolument engagée au service d'une construction urbaine durable.

PRINCIPES DE RECHERCHE

Les trois principes retenus peuvent être résumés ainsi ; (1) l'hydrologie urbaine est un champ de recherche résolument pluridisciplinaire, (2) l'usage des revêtements perméables permet de favoriser le renouvellement urbain notamment à l'échelle de la rue, (3) l'utilisation des revêtements perméables de manière intégrée avec la forme urbaine peut favoriser la résilience des villes face au risque d'inondation.

L'HYDROLOGIE URBAINE, UN CHAMP DE RECHERCHE PLURIDISCIPLINAIRE

La notion d'intégration traverse ce premier chapitre comme un fil rouge. Les défis mis en avant dans ce chapitre appellent une conception urbaine qui ne soit pas simplement efficace mais qui adapte la ville pour qu'elle modifie le moins possible le fonctionnement des milieux naturels (Chocat, 2009). Cette démarche doit être intégrée et globale, elle ne doit pas regarder les objets urbains selon un seul aspect mais toujours les considérer dans leur globalité. Un urbanisme ainsi conçu place la prise en compte du cycle naturel de l'eau à la croisée de différentes disciplines et acteurs, ce qui permet d'éviter le forçage artificiel des écoulements, limitant les risques de dysfonctionnements ou d'inondations (Piel et al., 2010). Comme cela a été développé précédemment (1.1.3.2) une telle approche intégrée de l'assainissement appliquée à l'échelle urbaine implique une évolution de la gouvernance et des acteurs.

Concernant ce travail de thèse, mettre en avant une approche intégrée implique de s'inscrire dans une démarche pluridisciplinaire. En effet, comme cela a été présenté (1.2.1.3 et 1.2.2.1), une structure à revêtements perméables ne sera jamais simplement un ouvrage de gestion de l'eau, elle possède également des fonctions mécaniques, d'atténuation acoustique, environnementales, etc. De plus, elle compose l'espace urbain assurant un rôle de desserte et de paysage qui est aujourd'hui du ressort des aménageurs, urbanistes et paysagistes. Ainsi, elle ne peut pas être étudiée seulement sous l'aspect hydraulique mais demande de croiser différentes disciplines telles que l'urbanisme, l'hydraulique, hydrologie, le génie-civil (mécanique, géotechnique), etc. Ces disciplines peuvent être regroupées sous l'appellation « génie urbain ». Ce terme souligne l'importance de l'intégration entre hydrologie et urbanisme.

Le travail présenté ici ne saurait malheureusement embrasser l'ensemble de ces disciplines et tous les enjeux liés aux usages des revêtements perméables. Même si il n'est pas plus approfondi, cet enjeu d'interdisciplinarité demeure important et les résultats présentés dans ce travail seront toujours à nuancer au regard du besoin de considérer les différents champs disciplinaires qui ne sont pas couverts ici. Enfin, la codirection de cette thèse lui donne de fait une assise multidisciplinaire intéressante, les différents choix pris dans la conduite de ce travail visent à exploiter et valoriser cette assise.

LES REVÊTEMENTS PERMÉABLES AU SERVICE DU RENOUVELLEMENT URBAIN

La littérature scientifique et les projets immobiliers réels présentent de nombreux exemples d'aménagements urbains prenant en compte une gestion alternative de l'eau. Un inventaire de ces aménagements permet de tirer quelques observations. La majorité des projets concernent des aménagements importants (« éco-quartier », ZAC) qui ont lieu soit sur des sites non urbanisés soit dans le cadre d'une transformation globale de friches industrielles. Peu de ces projets ont lieu en zone urbanisée dense. Peu de ces projets sont de petites tailles. Les techniques alternatives utilisées consistent majoritairement à créer des zones de stockage pour l'eau avec une prédominance importante pour l'utilisation des bassins de stockage ou d'infiltration. Ces techniques sont consommatrices d'espace, un espace disponible en raison de la non-densité des projets présentés. Or de nombreux auteurs soulignent l'importance de limiter l'étalement urbain en favorisant la reconstruction de la ville sur elle-même (Haase, 2009; Miller et al., 2014) (1.1.3.4). Cette logique s'inscrit dans une vision durable de l'urbanisation qui soit compatible avec la préservation des terres agricoles et des espaces naturels. Les techniques à revêtements perméables s'intègrent directement aux objets de l'aménagement urbain, places, parkings, voiries, et permettent de mettre en place une gestion des eaux pluviales qui ne se limite plus seulement aux « éco quartiers » mais peut être mise en place en milieu urbain dense et déjà urbanisé dans le cadre de rénovations urbaines ou de l'entretien des espaces publics.

Dans cet objectif de renouvellement urbain, la place des mobilités urbaines est très importante. Cette mobilité est actuellement en pleine transformation et passe progressivement du « tout pour la voiture » à la promotion du multimodal et des circulations douces. Pour accompagner cette transformation fortement incitée au niveau politique (comme l'exemple actuel de la question des berges de Seine à Paris), une transformation de la voirie et de son affectation va être nécessaire et est déjà entreprise dans de nombreuses villes (Hambourg par exemple a affiché son ambition de devenir une ville sans voiture d'ici vingt ans). Par ailleurs, il a été largement montré dans ce chapitre que la politique d'assainissement des villes passe de la gestion des eaux pluviales par le tout-à-l'égout à une gestion à la source, qui valorise l'eau, et cherche à rétablir les processus hydrologiques naturels. Ce passage des deux « tout » (*tout-à-l'égout* et *tout pour la voiture*) s'accompagne d'une réhabilitation physique de la rue qui offre l'opportunité de ne pas envisager l'urbanisme et l'assainissement séparément mais au contraire de les intégrer pour favoriser cette double transformation. Porter ces deux transformations de front permettrait très probablement une optimisation économique conséquente. Enfin, la rue est l'objet idéal pour faire travailler ensemble les acteurs de l'urbanisme et ceux de l'assainissement et ainsi favoriser l'évolution de la gouvernance largement souhaitée par les chercheurs en hydrologie urbaine. En effet, comme le souligne BERTRAND-KRAJEWSKI, les deux domaines, voirie et assainissement, doivent être pensés en commun (Bertrand-Krajewski, 2006). Les techniques alternatives et notamment les revêtements perméables s'inscrivent parfaitement dans cette logique d'allier les enjeux de mobilité et d'assainissement pluvial là où la conception traditionnelle de la voirie sépare ces fonctions.

Considérer la rue en milieu urbanisé comme l'espace géographique privilégié de la mise en œuvre des revêtements perméables est le second partis-pris de cette thèse. Concrètement cela se traduit par une modélisation à l'échelle du bassin versant qui se concentre spécifiquement sur la transformation de l'espace public.

LES REVÊTEMENTS PERMÉABLES POUR FAVORISER LA RÉSILIENCE URBAINE FACE AUX INONDATIONS

Comme cela a déjà été évoqué précédemment (1.1.3.3) il est important de chercher à limiter le risque d'inondation par des ouvrages intégrés avec la forme urbaine pour favoriser la résilience des villes face au risque d'inondation. Dans cette démarche, la voirie constitue l'un des premiers ouvrages de lutte contre les inondations, elle peut constituer une digue de protection, permettre d'évacuer les crues et constituer un réservoir de stockage écrêteur de crue (Abdo, 2007). L'usage des revêtements perméables peut être une opportunité pour souligner et renforcer ce rôle de la voirie dans la gestion des inondations.

Ce travail porte notamment sur le risque d'inondations soudaines, présenté au début de ce chapitre (1.1.2.1). Ce type d'inondation est particulièrement dû à la génération rapide du ruissellement de surface, et à la saturation des réseaux lors des évènements pluvieux importants. Limiter le ruissellement urbain contribue donc directement à limiter le risque d'inondation soudaine. Aussi ce travail s'appuie sur l'hypothèse simplificatrice que la quantification de la limitation du ruissellement urbain permet indirectement de quantifier la maîtrise du risque d'inondation. Cette hypothèse s'applique ainsi directement à l'objectif global de la thèse. La finalité qui en découle est de modéliser l'usage des revêtements perméables sur le domaine public dans le but de mettre en évidence les meilleures pratiques pour améliorer la maîtrise du ruissellement urbain, autrement dit de renforcer la résilience urbaine face aux inondations.

SYNTHÈSE DU CHAPITRE 1

L'étude des revêtements perméables est au croisement de nombreuses disciplines qui peuvent être regroupées sous l'appellation de « génie urbain ». Dans le cadre de ce travail les bénéfices de ces structures sont étudiés avec un prisme hydrologique en cherchant à quantifier leurs impacts sur le ruissellement de surface. Cette problématique est au cœur des défis actuels des villes. En effet, le ruissellement urbain est particulièrement impacté par l'urbanisation et son augmentation est l'une des raisons majeures de l'aggravation des phénomènes d'inondation (1.1).

Pour étudier les bénéfices potentiels des structures à revêtements perméables sur le ruissellement urbain il convient d'une part, d'améliorer la compréhension des processus hydrologiques dans ces structures (échelle de l'ouvrage), et d'autre part de quantifier leurs impacts une fois insérés dans un environnement urbain donné (échelle du bassin versant). Cette déclinaison en deux étapes permet de répondre à de nombreux enjeux de recherche spécifiques à chacune de ces échelles ainsi qu'aux nombreux enjeux liés à l'intégration de ces échelles.

Ce premier chapitre présente les choix et principes de recherche pris en vue de cette double modélisation (1.3.3 et 1.3.4), en s'appuyant sur le contexte général de l'hydrologie urbaine (1.1), les connaissances scientifiques sur les revêtements perméables (1.2) et celles liées à la modélisation hydrologique (1.3.1 et 1.3.2). Les nombreux auteurs et études cités dans cet état de l'art ont orienté et inspiré ce travail qui propose une modélisation ajustée en terme de complexité, ancrée dans un contexte régional, basée sur une description physique des matériaux et du terrain, et résolument au service de la diffusion de l'usage des structures à revêtements perméables.

CHAPITRE 2

2 DONNÉES AU SERVICE DE LA MODÉLISATION

INTRODUCTION DU CHAPITRE

Ce chapitre vise à présenter les données utilisées dans le travail de modélisation et la façon dont elles ont été obtenues. Il constitue une base d'informations où le lecteur peut trouver le détail des données utilisées par ailleurs. En effet, les modèles *PermetAble* et *PorousCity* requièrent différentes données : pour leur construction, leur éventuelle calage, leur vérification et leur exploitation. Les données nécessaires au travail de modélisation sont synthétisées dans le Tableau 2.1. Pour organiser leur présentation, ces données sont regroupées en quatre ensembles qui forment chacun une section de ce chapitre.

Tableau 2.1 – Synthèse des données nécessaires pour les modèles *PermetAble* et *PorousCity* et renvoi vers les paragraphes de présentation des données respectives.

Donnée	Présentation de la donnée	Modèle(s)
Propriétés physiques et hydrologiques des matériaux de la structure et du sol (porosité, teneur en eau, perméabilité)	2.1.1	*PermetAble*
Courbe de rétention d'eau (CRE) des matériaux de la structure et du sol (paramètres de VAN GENUCHTEN)	2.1.2	*PermetAble*
Composition et géométrie de la structure	2.1.3.1 et 2.1.3.2	*PermetAble* *PorousCity*
Coefficient de ruissellement et d'interception de la surface contributrice	2.1.3.3	*PermetAble* *PorousCity*
Données expérimentales pour le calage du modèle *PermetAble*	2.2.2.1	*PermetAble*
Donnée expérimentales pour la vérification du modèle *PermetAble*	2.2.2.2	*PermetAble*
Topographie du bassin versant	2.3.2.1	*PorousCity*
Occupation du sol du bassin versant	2.3.2.2	*PorousCity*
Propriétés hydrogéologiques du bassin versant (perméabilité du sol, hauteur de nappe)	2.3.1.2	*PorousCity*
Description des ouvrages de gestion des eaux pluviales du bassin versant	2.3.2.3	*PorousCity*
Observations de terrain pour la vérification du modèle *PorousCity*	2.3.2.3	*PorousCity*
Hyétogrammes utilisées comme données d'entrée	2.4.2.5	*PermetAble*

Section 2.1. Propriétés des matériaux et de la structure. Cette section décrit les matériaux utilisés pour la modélisation des structures à revêtements perméables. Ces informations sont notamment utilisées pour le modèle *PermetAble*. La section détaille les sources ou mesures expérimentales réalisées pour la description des propriétés des matériaux. Elle présente en particulier la méthodologie de détermination des courbes de rétention d'eau des différents matériaux. La description de la géométrie et de la composition de la structure perméable ainsi que de son environnement est ensuite détaillée pour les deux modèles.

Section 2.2. Expériences quantitatives sur banc d'essai en laboratoire. Cette seconde section présente les données expérimentales utilisées pour le calage et la vérification du modèle *PermetAble*. Ces données ont été obtenues lors de cinq essais réalisés sur un banc d'essai expérimental.

Section 2.3. *Riva Bella*, site d'application du modèle *PorousCity*. La section 2.3 présente le site choisi pour une application de la modélisation à l'échelle du bassin versant. Dans un premier temps, cette section détaille les spécificités du bassin versant retenu et en présente ses enjeux et ses limites. Cette présentation permet de revenir sur les raisons qui justifient le choix de ce bassin versant comme site d'application du modèle *PorousCity*. Dans un second temps, les sources et la qualité des données utilisées pour la représentation de ce site dans le modèle sont présentées. La topographie, l'occupation du sol et le fonctionnement hydrologique du site sont détaillés en soulignant les points d'intérêt et les limites des données en vue de la modélisation.

Section 2.4. Caractérisation de la pluviométrie locale. La modélisation, qu'elle soit à l'échelle de la structure ou du bassin versant, nécessite des données pluviométriques. Cette section présente la méthodologie suivie pour caractériser la pluviométrie locale et ainsi sélectionner des données de précipitations représentatives du climat de Caen et ses environs. Ces données sont utilisées dans les deux modèles comme données d'entrée pour tester le comportement et les bénéfices des structures à revêtements perméables pour différents régimes pluviométriques.

Ces quatre sections sont indépendantes entre elles dans leur contenu et leur compréhension. Ce chapitre est complété par trois annexes qui apportent des informations complémentaires ou donnent une présentation plus complète des données utilisées :

- Annexe B : le colmatage des revêtements perméable ;
- Annexe C : présentation des hyétogrammes des typologies d'événements ;
- Annexe D : fiche climatologique de Météo-France pour la station de Caen-Carpiquet.

SECTION 2.1

2.1 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX ET DE LA STRUCTURE

La modélisation physique d'une structure à revêtements perméables dans le modèle PermetAble et *PorousCity* nécessite la connaissance des propriétés des matériaux qui la composent et la description de la structure modélisée. Cette section décrit les propriétés des structures perméables en trois temps. D'abord la sous-section 2.1.1 présente la description des propriétés des matériaux, notamment leurs propriétés hydrologiques ; perméabilité, porosité, etc. Cette caractérisation est basée à la fois sur des documentations techniques, de la littérature scientifique et des essais en laboratoire. Ensuite la sous-section 2.1.2 détaille la détermination de la courbe de rétention d'eau des différents matériaux qui composent la structure. Cette détermination est basée sur le modèle de KOVACS modifié (Aubertin et al., 2003). Enfin, la sous-section 2.1.3 présente la représentation de la géométrie de la structure et de son environnement dans les deux modèles.

2.1.1 PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

Cette sous-section détaille successivement les propriétés des matériaux qui composent la structure modélisée. Le Tableau 2.2 synthétise les résultats de la description des matériaux considérés, de haut en bas ; couche de surface (béton drainant), lit de pose (gravillon), fondation (gravier), sol naturel (sable, limon, argile). Les valeurs indiquées ici sont celles utilisées dans le modèle *PermetAble*.

Tableau 2.2 - Synthèse des propriétés physiques et hydrologiques des matériaux de la structure perméable et du sol modélisés dans le modèle *PermetAble*

	Masse volumique apparente sèche	Diamètre équivalent des grains	Porosité totale	Porosité ouverte	Teneur en eau de rétention	Teneur en eau résiduelle	Perméabilité saturé	Gel / dégel	Résistance colmatage	Résistance compression	Résistance traction
	ρ_{as}		P_t	$P_o = \theta_s$	θ_c	θ_r	K_s			R_c	R_t
	kg/m3	*mm*	*%*	*%*	*%*	*%*	*m/s*	*Nbr cycle*	*% K_s*	*MPa*	*MPa*
Béton drainant classique	1800 ∓ 200		30 ∓ 3	20 ∓ 5	10 ∓ 2		6.10^{-4}à 6.10^{-3}	115 ∓ 35	36 %	de 13 à 28	de 2 à 3.6
Béton drainant coquillé	1850 ∓ 50	2.7∓0.5	31.5 ∓ 4.5	22 ∓ 2	8.6∓ 2	2.2 ∓ 0.5	3.10^{-4} à 3.10^{-3} ⇨ 1.10^{-3}	90 ∓ 40	42 %	de 15 à 29	de 2 à 3.6
Gravillon	1400∓ 50	2 - 6	47.5 ∓ 2.6		8.4∓ 0.5	0.5∓ 0.1	1.10^{-4} à 1.10^{-3} ⇨ 1.10^{-3}				
Gravier	1550 ∓ 50	2 - 20	40 ∓ 3		4.1 ∓ 0.5	0.4	1.10^{-3} à 0.1 ⇨ 5.10^{-2}				
Géotextile		0.06					0.02 à 0.03 ⇨ 0.025				23 ∓ 2
Sable	1575	0.05 à 2	36.5		10	5	$1. 10^{-6}$ à 1.10^{-3} ⇨ 5.10^{-4}				
Limon	1450	0.002 à 0.05	43		23	10	1.10^{-8} à 1.10^{-5} ⇨ 5.10^{-6}				
Argile	1175	< 0.002	45		37	20	1.10^{-11} à 1.10^{-8} ⇨ 5.10^{-9}				

Le symbole ∓ donne la plage de variation de la valeur. En cas de plage de variation importante, le symbole ⇨ indique la valeur retenue dans le modèle. Tous les paramètres intervenant dans le modèle ont fait l'objet d'une étude de sensibilité en faisant varier chacun de ces paramètres dans sa plage de variation. Concernant la caractérisation du sol, les valeurs ont été définies à partir de la littérature, elles représentent une réalité possible et n'ont pas pour objet de couvrir toute la plage de valeurs réalistes pour les trois typologies de sol retenues (sable, limon et argile).

2.1.1.1 BÉTON DRAINANT (COUCHE DE SURFACE)

La couche de surface peut être composée de différents matériaux (bitume ou béton drainant, pavés à joints larges, dalles alvéolées enherbées ou avec des gravillons), dans le cadre de ce travail seul le béton drainant est considéré.

Le béton drainant est un matériau composite formulé à partir des mêmes constituants que le béton ordinaire : le ciment, l'eau et les granulats. Il se différencie d'un béton classique par la quasi-absence, voire l'absence de sable et de particules fines et une granularité discontinue avec l'utilisation de graviers monogranulaires. Ces différences de constitution, comparées à un béton ordinaire, favorisent la formation de vides, ouverts et interconnectés, qui donnent au béton son caractère drainant (Nguyen, 2014).

La norme NF P 98-170 définit les bétons drainants et poreux comme des bétons avec une porosité ouverte d'au moins 10 % (AFNOR, 2006). Ces bétons ont généralement une porosité totale de 15 à 40 %, une porosité ouverte de 15 à 25 %, une résistance en compression allant de 3.5 à 28.0 MPa (classe de résistance de 1 à 3) et une perméabilité de 0.6 à 6 mm/s (Agouridis et al., 2011; Nguyen, 2014). L'ensemble de ces propriétés dépend de la formulation du béton, notamment du rapport eau/ciment (E/C) choisi et de la classe granulaire (Nguyen, 2014). Le Tableau 2.3 détaille les différents constituants du béton drainant et donne quelques ordres de grandeur d'après une formulation utilisée dans la thèse de NGUYEN (Nguyen, 2014).

Tableau 2.3 – Présentation des spécificités des composants et de la formulation du béton drainant d'après (Nguyen, 2014; Tennis et al., 2004)

Matériau	Observations	Formulation générale	(Nguyen, 2014)
Ciment	Idem que béton ordinaire	270 à 415 kg/m3	301 à 363 kg/m3(Nguyen, 2014)
Eau	La teneur en eau et le rapport E/C doivent être parfaitement contrôlés.	Rapport E/C : - 0.27 à 0.34 avec adjuvent - 0.34 à 0.40 sans adjuvant	111 à 134 kg/m3 Rapport E/C : 0.37 Volume de pâte : 20,7 à 25 %
Gravier	Principal constituant du béton drainant. La classe granulaire, la taille et le type des graviers influencent les propriétés du béton drainant.	1190 à 1600 kg/m3 Rapport massique G/C : de 4,0 à 4,5 Granulométrie discontinue de type monogranulaire	1574 kg/m3 Granulométrie : 40 % - 2/4 mm 60 % - 4/6,3 mm Porosité 42,1 %
Sable/ fine	Généralement non présent. Parfois utilisés pour améliorer la résistance mécanique et au gel/dégel.	Environ 100 kg/m3 (max 175 kg/m3) Rapport S/G : de 5 à 7 %	110 kg/m3 Granulométrie : 0/4 mm
Adjuvant	Idem qu'un béton ordinaire. Retardateur de prise utilisé pour maintenir E/C faible.		

L'état de l'art concernant la formulation des bétons drainants n'est pas plus détaillé dans ce rapport, le lecteur est invité à se reporter à la thèse de Dang NGUYEN pour plus de détails sur la formulation des bétons drainants (Nguyen, 2014).

Dans ce document, deux types de bétons drainants seront distingués : le béton drainant dit « classique » et le béton perméable dit « coquillé », développé à l'ESITC Caen (Brevet n° 1402730 ou 1501181), qui incorpore des coquilles broyées en substitution d'une partie des granulats (Nguyen et al., 2013, 2014). L'incorporation de coquilles dans la formulation des bétons répond à une double problématique environnementale : la surconsommation de granulats (2ème ressource la plus utilisée après l'eau au niveau mondial et français) et la valorisation des coquilles vides, aujourd'hui considérées comme un déchet.

Ciment 52,5 N | Sable 0-4 mm | Gravier 4-10 mm | Coquilles broyés 2-6 mm | Pavé de béton drainant 10 cm x 10 cm x 8 cm

Figure 2.1– Photos des pavés drainant coquillés développés à l'ESITC Caen, et des matériaux utilisés dans leur formulation (Nguyen et al., 2013)

Différents essais ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Dang NGUYEN pour caractériser les propriétés des bétons drainants formulés (classiques ou coquillés). Les normes et protocoles d'essais suivis ainsi que les valeurs seuil à atteindre sont issus de la littérature (Abdo, 2007; ACI, 2010; Agouridis, et al., 2011; EPA, 1999; Kevern et al., 2009; Nguyen, 2014; Tennis et al., 2004).

Tableau 2.4 – Listes des essais de caractérisation des bétons drainants réalisés dans le cadre de la thèse de NGUYEN (Nguyen, 2014) et des objectifs à atteindre pour chaque propriété mesurée.

Essais	Description	Objectif à atteindre
Affaissement au cône d'ABRAMS		Affaissement nul
Résistance en compression R_c	Sur éprouvette 150x150x150 à 28j. Norme NF EN 12390	Chaussée véhicules légers > 17 MPa Parking > 14 MPa
Résistance en traction par fendage R_t	Sur éprouvette 150x150x150 à 28j. Norme NF EN 1338.	> 2.5 MPa
Porosité totale P_t et masse volumique sèche	Norme NF P18-459. + Analyse d'image	
Porosité ouverte P_o et masse volumique à l'air	Méthode de déplacement de l'eau. Norme NF P 98-170.	>10 % > 15 % / colmatage
Coefficient de perméabilité à l'eau	Essai à charge variable et à charge constante.	> 1 mm/s
Résistance au gel/dégel	Cycle de 24h de -18 à + 20 °C. Norme NF EN 1338. Avec et sans NaCl.	300 cycles ou perte masse de 15 %
Lixiviation	Se reporter à la thèse (Nguyen, 2014).	
Résistance à l'abrasion	Essai abrasion au disque large. Norme NF EN 1338	Largeur d'empreinte < 20 mm
Résistance à la glissance	Essai du pendule de frottement. Normes NF EN 1338 et NF P 98-335.	Résistance à la glissance > 35
Colmatage	Se reporter à la thèse (Nguyen, 2014)	P_o > 15 %

Ces essais ont été complétés dans le cadre de ce travail par des mesures en laboratoire afin d'identifier les seuils de teneurs en eau résiduelle et à rétention. Le même protocole a été utilisé pour le béton drainant, les gravillons et le gravier, il est basé sur la méthode dite « gravimétrique » qui permet de déduire les différents seuils de teneur en eau à partir des mesures massiques (Chossat, 2005). Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.2.

Protocole : d'après la méthode dite « gravimétrique » (Chossat, 2005).

- **Masse de l'échantillon sec.** Déterminée après séchage du matériau en étuve : 50°C pendant 48h.
- **Teneur en eau à saturation (θ_s).** Pour les gravillons et graviers, saturation du matériau à volume fixe avec pesée de la masse d'eau ajoutée. Pour les pavés, immersion avec mesure du volume d'eau déplacé.
- **Teneur en eau à rétention (θ_0).** Mesure de la masse après égouttage gravitaire du matériau.
- **Teneur en eau résiduelle (θ_r).** Suivi de la masse en continu lors du séchage en condition intérieure (température comprise entre 21 et 22.5°C) jusqu'à stabilisation de la masse. Ce séchage en intérieur ne représente pas fidèlement l'évaporation dans des conditions extérieures et ne permet donc pas d'étudier la dynamique d'évaporation. Cette mesure permet néanmoins de mesurer la quantité d'eau « évaporable » et celle résiduelle retenue dans le matériau.

2.1.1.2 GRAVILLONS (LIT DE POSE) ET GRAVIERS (COUCHE DE FONDATION)

La description des gravillons et des graviers est basée sur les matériaux utilisés pour la réalisation d'un site expérimental de structure à revêtements perméables situé sur le parking du laboratoire de l'ESITC Caen.

a. Lit de pose

Le lit de pose doit avoir une perméabilité à l'eau suffisante ($K_s > 0{,}1$ mm/s), aussi le sable utilisé pour les chaussée conventionnelles n'est pas approprié car il présente bien souvent une perméabilité trop faible. Les gravillons utilisés pour le lit de pose doivent être assez fins pour installer précisément des pavés. Pour assurer correctement sa fonction mécanique, cette couche doit avoir une épaisseur inférieure à 5 cm avant compactage et supérieure à 3 cm après compactage (CERIB, 2009; CERTU, 1999).

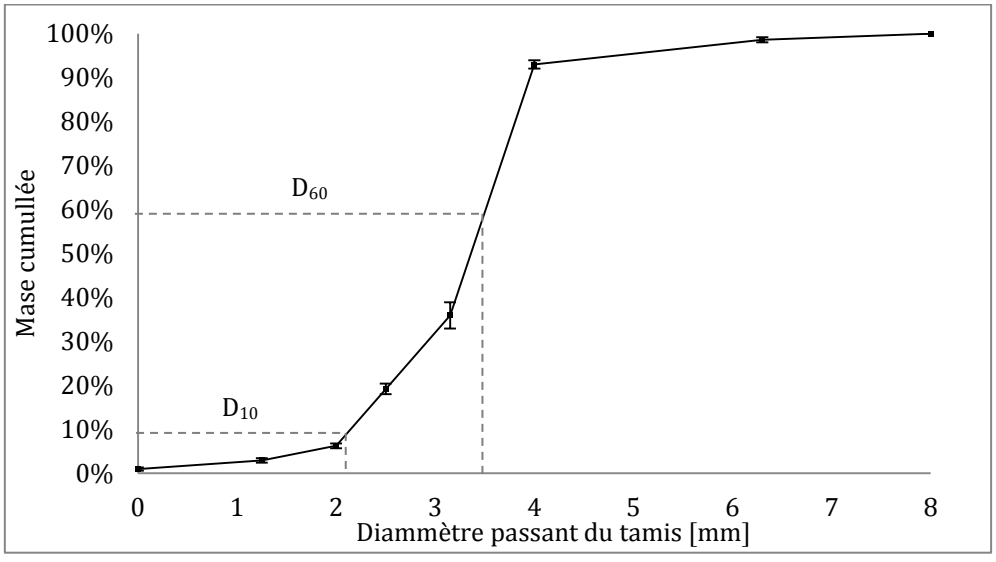


Figure 2.2 – Courbe granulométrique cumulée des gravillons utilisés pour le lit de pose des structures perméables représentées dans le modèle *PermetAble*. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart type des mesures expérimentales.

Dans le cadre de ce travail, le lit de pose considéré est composé de gravillons 2-6 mm dont la courbe granulométrique est présentée sur la Figure 2.2. Elle a été réalisée en laboratoire sur différents échantillons de gravillon utilisés sur le chantier test de l'ESITC Caen. Le diamètre passant à 10 % D_{10} est de 2,2 mm (+/- 0,1 mm) et le diamètre passant à 60 %, D_{60}, est de 3,5 mm (+/- 1 mm).

b. Couche de fondation

La couche de fondation est parfois décomposée en une couche de fondation et une couche de sous-fondation ou de stockage qui assure le stockage de l'eau dans la structure perméable. Cette distinction ne sera pas retenue par la suite. Sa porosité ouverte influence sa capacité de stockage, aussi est-il intéressant d'optimiser la porosité (de 35 à 40 %) tout en assurant un compactage (98 % de la densité sèche maximale) et une capacité de portance suffisante. La fondation est généralement réalisée en granulats concassés (Abdo, 2007).

D'autres matériaux peuvent également être utilisés et permettre d'augmenter considérablement la porosité ou la perméabilité (Dakhlaoui, 1996) :

- matériaux traités au liant bitumineux (grave bitumes drainantes) : 0/20 ou 0/30 porosité ouverte 13 à 15 %, totale 20%, perméabilité $1 \cdot 10^{-2}$ m/s ;
- matériaux traités au liant hydraulique (béton poreux) : porosité ouverte 20 à 26 %, perméabilité $> 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ m/s ;
- matériaux non liés : porosité 20 à 50 %, perméabilité $1 \cdot 10^{-1}$ m/s ;
- matériaux alvéolaires en plastique : porosité > 90 % ;

Dans le cadre de ce travail, la couche de fondation est composée de graviers 4-20 mm dont la courbe granulométrique est présentée sur la Figure 2.3. Comme pour le lit de pose, la granulométrie a été réalisée en laboratoire sur différents échantillons de graviers utilisés sur les chantiers test. Le diamètre passant à 10 % D_{10} est de 3,3 mm (+/- 0,2 mm) et le diamètre passant à 60 % D_{60} est de 12 mm (+/- 0,5 mm).

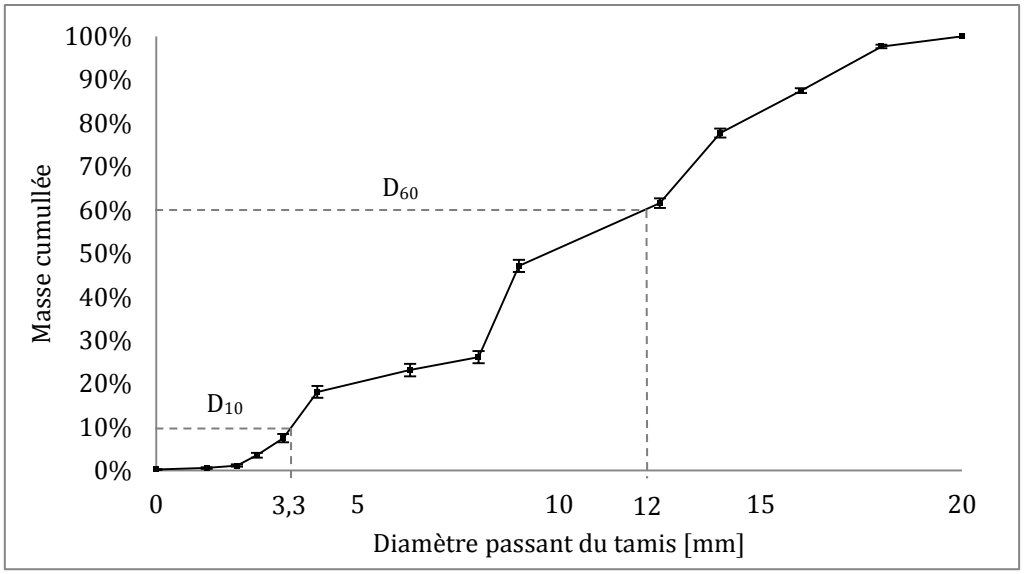


Figure 2.3 - Courbe granulométrique cumulée des graviers de la couche de fondation des structures perméables représentées dans le modèle *PermetAble*. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart type des mesures expérimentales.

L'épaisseur de la couche de fondation doit être adaptée pour répondre aux exigences mécaniques (en fonction de l'intensité de la circulation et de la nature de la couche de sol), en fonction de la quantité d'eau à stocker (une ou plusieurs pluies successives, réception des eaux provenant de revêtements imperméables proches) et doit permettre d'assurer un sol sans gel. L'épaisseur de la couche de fondation dépend également des conditions de son drainage (infiltration dans le sol, drain, etc.). Il est généralement préconisé d'avoir un temps de stockage maximum de l'eau dans la structure de 24 à 48 h (maximum 72 h) pour éviter un débordement en cas de pluies successives (CERTU, 2003; Faleyeux, 2015).

À noter que la couche de fondation repose généralement sur la couche de forme qui doit répondre à différentes exigences. Assurer la traficabilité pendant la phase de mise en œuvre de la chaussée, permettre le compactage efficace de la couche de fondation de la chaussée, permettre le nivellement satisfaisant de la plateforme support de chaussée, assurer la protection de l'arase des terrassements vis-à-vis des agents climatiques avant la réalisation de la chaussée. En cas d'infiltration dans le sol, la couche de forme doit également permettre la bonne infiltration de l'eau. Dans le cadre de ce travail, la fondation sera considérée comme reposant directement sur le sol naturel, avec une épaisseur suffisante pour assurer la portance quelles que soient les conditions de sol.

Enfin, comme pour les pavés drainants, les différents seuils de teneur en eau de la couche de fondation et du lit de pose ont été déterminés par des essais de suivi massique en laboratoire et comparés aux valeurs données dans la littérature (Abdo, 2007; M Aubertin et al., 2003; Cosandey et Robinson, 2000; Dakhlaoui, 1996; Goutaland et al., 2007). Les valeurs de perméabilité saturée de ces deux matériaux ont été déterminées à partir d'une revue bibliographique (Abdo, 2007; Michel Aubertin et al., 2005; Faleyeux, 2015; Goutaland et al., 2007). Toutes les valeurs sont présentées dans le Tableau 2.2.

2.1.1.3 GÉOTEXTILE, GÉOMEMBRANE ET DRAIN

Lors de la réalisation de structures perméables, un géotextile de filtration et de séparation est généralement installé entre le lit de pose et la couche de fondation pour piéger les particules et assurer une séparation entre ces deux couches. Lorsque qu'il est nécessaire d'empêcher l'infiltration de l'eau dans le sol, une géomembrane imperméable est installée en fond de structure, accompagnée d'un géotextile de protection. Quand l'infiltration est possible, un géotextile de séparation et de renforcement est généralement installé en fond de structure entre la couche de fondation et le sol.

Il a été choisi de ne pas considérer les géotextiles dans la modélisation. Leur perméabilité est considérée comme étant suffisamment élevée pour ne pas influencer l'écoulement de l'eau dans la structure. Cette hypothèse est satisfaisante au regard de la valeur de perméabilité du géotextile utilisé sur site (environ 25 mm/s), néanmoins elle ne permet pas de rendre compte de son effet sur la rétention de l'eau et du potentiel de colmatage du géotextile situé entre le lit de pose et la couche de fondation (Chapitre 3). Un tel colmatage peut en effet diminuer la perméabilité dans la structure au niveau du géotextile. Concernant la géomembrane, elle est représentée le cas échéant dans le modèle par une condition limite de flux nul (Chapitre 3).

Le drain représenté dans le modèle PermetAble correspond à celui utilisé dans le banc d'essai en laboratoire. Il s'agit d'un drain perforé de 5 cm de diamètre, en PVC souple, sans cunette. Seul le diamètre est modifié dans le modèle, il est fixé à 10 cm pour la majorité des simulations.

2.1.1.4 SOL NATUREL

Les structures à revêtements perméables reposent sur un sol naturel qui assure une fonction mécanique (assise porteuse), généralement complétée d'une fonction hydraulique (évacuation de l'eau par infiltration). La caractérisation des propriétés du sol doit ainsi répondre à un large spectre de questions, nécessaires pour évaluer la pertinence de l'usage de revêtements perméables et envisager une conception et un dimensionnement adaptés de la structure.

Tableau 2.5 - Présentation des propriétés à considérer pour la description du sol et de leur importance pour la réalisation de structures perméables.

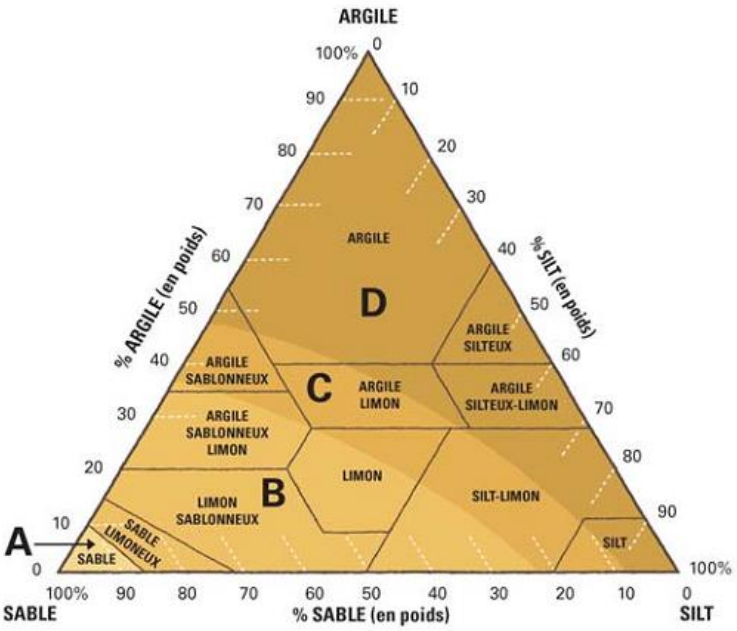
Propriétés	Commentaires	Sources bibliographiques
Perméabilité	Propriété majeure pour déterminer les possibilités d'infiltration. Quatre cas de perméabilité sont souvent distingués : imperméable, peu perméable, perméable et très perméable.	(Barraud, 2009; CERTU, 2003; Tennis et al., 2004; Winiarski, 2007);
Composition du sol	Texture, granulométrie. Permet de déduire des informations sur les autres propriétés.	(Barraud, 2009; Baud, 2008; Gromaire et al., 2013)
Épaisseur de la couche non saturée	Critère qui conditionne la possibilité d'infiltration (profondeur du toit de nappe > 1 mètre[6]). Permet de déduire le profil de teneur en eau.	(Barraud, 2009)
Homogénéité et singularités	Hétérogénéités hydrodynamiques ou sédimentaires ; chemin préférentiel, nappe perchée, cavité naturelle, etc.	(Barraud, 2009; Winiarski, 2007)
Pollution préexistante du sol	Important pour déterminer si l'infiltration est possible et dans quelles conditions.	(Barraud, 2009)
Teneur en eau du sol	Liée aux conditions climatiques extérieures et à la présence d'une nappe. Évolue au cours du temps	(Baud, 2008)
Compaction du sol	Influence l'interception en surface et l'infiltration.	(Baud, 2008)
Réaction du sol à la présence temporaire d'eau	Particulièrement important en cas de sols argileux sensibles au gonflement et retrait.	(Argue et al., 2005)
La portance	Capacité à supporter la charge, détermine la couche de forme et de fondation nécessaire.	
La sensibilité au gel	Influence l'épaisseur de la couche de fondation.	

Pour le travail de modélisation, seules la perméabilité du sol et la profondeur du toit de nappe seront considérées.

La perméabilité du sol (exprimé par la perméabilité saturée K_s) peut être déduite de la texture du sol, mesurée *in situ* ou mesurée sur des prélèvements de sol en laboratoire. La Figure 2.4 présente le triangle textural sur lequel des zones de perméabilités différentes sont identifiées.

Pour la majorité du travail de modélisation une approche générique sera utilisée pour déterminer K_s. Elle consiste à définir différentes typologies de sols basées sur la littérature. Trois types de sols sont ainsi retenus : sableux, limoneux et argileux. Cette typologie ne vise pas à représenter l'ensemble du spectre réaliste des sols observables mais à donner trois conditions différentes qui seront comparées entre elles. Les propriétés retenues pour ces trois sols ont été présentées dans le Tableau 2.2.

[6] La profondeur recommandée entre le fond de la structure perméable et le toit de nappe varie en fonction des auteurs entre 1 à 2 mètres.



A : Zone très perméable

B : Zone perméable

C : Zone peu perméable

D : Zone imperméable

Sable : Particule dont le diamètre est compris entre 0,05 mm et 2 mm

Limon : Particules dont le diamètre est compris entre 0,05 et 0,002 mm

Argile : Particules dont le diamètre est inférieur à 0,002 mm

Figure 2.4 - Triangle de corrélation entre la texture du sol et sa perméabilité (Grand Lyon, 2008a)

Quand la modélisation visera à représenter explicitement des conditions de sols réelles, une approche contextualisée sera alors adoptée et les propriétés du sol présent sur site seront utilisées. Cette situation concerne notamment le site d'étude à Ouistreham, présenté à la section 2.3.

2.1.2 DESCRIPTION DES COURBES DE RÉTENTION D'EAU DES MATÉRIAUX UTILISÉS

La sous-section précédente a présenté l'ensemble des propriétés des matériaux utilisés, à une exception près, les paramètres de leur courbe de rétention d'eau (CRE). La courbe de rétention d'eau est une propriété essentielle pour la caractérisation des matériaux. Comme cela est détaillé dans l'annexe A, la CRE permet de lier la teneur en eau avec la pression interstitielle dans les milieux poreux. Cette relation entre ces deux variables est indispensable à la modélisation de l'écoulement de l'eau dans les structures perméables. Elle sera décrite dans le cadre de cette thèse par la loi de VAN GENUCHTEN (Van Genuchten, 1980). Cette sous-section développe spécifiquement les différentes méthodes de détermination des CRE et présente celle retenue pour ce travail, la méthode de KOVACS modifiée (Aubertin et al., 2003). Les valeurs des paramètres de VAN GENUCHTEN ainsi obtenues sont détaillées dans le Tableau 2.6.

2.1.2.1 ÉTAT DE L'ART SUR LA DÉTERMINATION DES COURBES DE RÉTENTION D'EAU

Plusieurs méthodes de détermination de la CRE existent. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes. Les méthodes descriptives à partir de points expérimentaux obtenus au laboratoire ou *in situ* (Bussière, 1999; Londra et Kargas, 2018) et les méthodes prédictives à partir des propriétés du milieu poreux. Ensuite, cinq modèles de lissage sont couramment utilisés (Bussière, 1999) pour passer d'un ensemble de points à une expression mathématique qui exprime θ en fonction de h ou inversement. Ce sont des modèles exponentiels, de puissance, de cosinus hyperboliques, polynomiaux et des modèles avec fonction d'erreurs (Brooks et Corey, 1964; Fredlund et Xing, 1994; Gardner, 1958; Leong et Rahardjo, 1997; Van Genuchten, 1980). Dans le cadre de cette thèse, la relation de VAN GENUCHTEN a été retenue en raison de sa grande diffusion dans la littérature, ce qui permet de comparer les coefficients utilisés avec d'autres travaux de recherche.

La loi de VAN GENUCHTEN décrit la CRE par la relation suivante (Van Genuchten, 1980).

Équation 2.1 – Loi de VAN GENUCHTEN

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{1}{1+(\alpha \cdot h)^n}\right)^m$$

Cette relation est construite à partir de trois paramètres dit de « VAN GENUCHTEN » : α [L^{-1}] un paramètre de forme qui représente l'inverse de la pression d'entrée de l'air (Ψ_a) et les paramètres n et m [-] qui sont liés à la distribution granulométrique du milieu. Les paramètres n et m sont reliés par la condition de MUALEMS, $m=1 - 1/n$. Tout l'enjeu des différentes méthodes d'estimation de la CRE consiste donc à estimer les paramètres de VAN GENUCHTEN α et n. À noter que cette relation nécessite également la connaissance de θ_r et de θ_s, d'où l'importance de la caractérisation en laboratoire des différents seuils de teneur en eau présentée en annexe A.

Avec la méthode descriptive, l'accès aux points expérimentaux est onéreux et les méthodes sont difficiles à mettre en œuvre quand les sites sont étendus. De plus, les approches expérimentales sont difficilement adaptables au béton drainant. Les méthodes de prédiction quant à elles estiment la forme des CRE à partir des propriétés physiques et chimiques des sols ou à partir de données climatiques. Dans le premier cas, ce sont des modèles mathématiques qui relient la teneur en eau aux propriétés physiques et chimiques du sol telles que la granulométrie, la teneur en matière organique et en argile, l'état et la capacité cationique du sol (Arya et al., 1999; Arya et Paris, 1981; Aubertin et al., 2003; Haverkamp et Parlange, 1986; Kovacs, 1981; Mbonimpa et al., 2002; Tyler et Wheatcraft, 1989, 1990). Dans le second cas, ce sont des modèles empiriques qui

lient le degré de saturation de l'eau aux données climatiques et aux hauteurs de précipitations (Bittelli et al., 2012).

Dans le cadre de cette étude, il apparait préférable d'utiliser des modèles prédictifs pour lesquels la CRE est construite à partir de paramètres physiques du milieu. En effet, les modèles liés aux données climatiques sont plus adaptés à l'étude de site *in situ* qu'à l'étude des matériaux utilisés dans la réalisation des structures perméables. La littérature présente de nombreux modèles prédictifs, chacun ayant généralement une gamme de validité de prédilection en fonction du contexte qui a motivé son développement. Par exemple, la méthode BEST (Londra et Kargas, 2018) est bien adaptée pour les milieux où les éléments de granulométrie inférieure à 2 mm sont majoritaires, inversement la méthode d'Arya et Paris (Arya et Paris, 1981) est plus adaptée dans les cas contraires (Goutaland et al., 2007).

Parmi ces modèles, celui proposé par KOVACS (Kovacs 1981) est particulièrement intéressant. Ce modèle est basé sur l'estimation de la CRE de matériaux incompressibles, dans des conditions de drainage et il établit une distinction entre la rétention d'eau due aux forces capillaires et celle due aux forces d'adhésion (Aubertin et al., 2003; Mbonimpa et al., 2002). Cette approche est particulièrement bien adaptée pour la prédiction de la CRE des matériaux granulaires pour lesquels elle présente une vision plus réaliste des processus en jeu, elle l'est moins pour les matériaux argileux où les forces capillaires deviennent négligeables devant les forces adhésives. Ce constat est intéressant dans le cadre de ce travail où les matériaux étudiés sont granulaires (béton drainant, gravillons, graviers) et sont proches (voir hors) de la limite de validité des autres modèles. Ce modèle a été repris par Aubertin (Aubertin et al., 2003; Aubertin et al., 2005) qui propose une version modifiée du modèle de KOVACS, appelé par la suite modèle de KOVACS Modifié (KM) et détaillé au point suivant. Ce modèle a le mérite d'utiliser des paramètres physiques du sol faciles à déterminer et les résultats obtenus par Aubertin montrent que, dans l'ensemble, le modèle de KOVACS modifié prédit bien les courbes de rétention d'eau (Aubertin et al., 2005).

2.1.2.2 LE MODÈLE DE KOVACS MODIFIÉ

a. Détermination de la CRE à partir du modèle KM

Le modèle de KOVACS modifié permet de prédire la CRE des matériaux de sol en connaissant leur porosité n et les paramètres granulométriques (D_{10} et D_{60}). Ce modèle considère que l'eau est retenue dans les matériaux poreux par les forces capillaires et des forces d'adhésion. Les forces capillaires sont responsables de la saturation capillaire, S_c, et les forces d'adhésion responsables de la saturation par l'adhésion, S_a, les deux agissant simultanément dans la détermination de la CRE (Kovacs, 1981). Ainsi, dans la formulation du modèle KM, le degré de saturation, S_r, est exprimé (en %) comme une fonction de S_c et de S_a, d'après l'équation suivante.

Équation 2.2 - S_r

$$S_r = \frac{\theta}{n} = S_c + S_a \times (1 - S_c)$$

L'utilisation de l'Équation 2.2 permet de tracer une fonction $h = f(\theta)$. À partir de cette relation entre h et θ il est possible d'ajuster les valeurs des paramètres de VAN GENUCHTEN, α et n, de telle façon que la CRE décrite par la loi de VAN GENUCHTEN s'ajuste sur la CRE prédite par le modèle KM. L'utilisation de cette méthode dans le cadre de ce travail est détaillée au point 2.1.2.3.

b. Détermination de la hauteur de remontée équivalente

Pour exprimer S_c et S_a en fonction de la pression interstitielle, le modèle KM définit une hauteur de remontée capillaire équivalente h_{co} [L]. Le rôle de ce paramètre est le même que la moyenne de remontée capillaire proposée par KOVACS (Kovacs 1981) dans le modèle d'origine. La détermination de ce paramètre est basée sur la loi de JURIN qui exprime la remontée capillaire dans un tube (la remontée capillaire est inversement proportionnelle au diamètre du tube). Cependant, la porosité dans les milieux poreux n'est pas uniforme aussi KOVACS (Kovacs 1981) a défini un diamètre équivalent D_{eq} [L].

Équation 2.3 - D_{eq}

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot V_v}{S_v}$$

Avec : V_v [L^3] le volume des vides et S_v [L^2] la surface spécifique des vides.

S_v peut être exprimée à partir de la masse surfacique spécifique des grains S_m [$L^2 \cdot M^{-1}$]. L'équation de D_{eq} peut alors s'écrire sous la forme suivante.

Équation 2.4 - D_{eq}

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot e}{\rho_s \cdot S_m}$$

Avec : e [-] l'indice des vides.

Même si S_m peut être mesurée par différentes techniques, dans la plupart des cas, cette valeur n'est pas directement connue. Pour les sols grossiers, la valeur de S_m peut être estimée à partir de la distribution granulaire en suivant une équation proposée par Kovacs (Kovacs 1981).

Équation 2.5 - S_m

$$S_m = \frac{\alpha_s}{\rho_s \cdot D_h}$$

Avec : α_s [-] un facteur de forme compris entre 6 et 18 ($\alpha = 10$ étant utilisé dans le modèle d'origine de Kovacs) et D_h est un diamètre équivalent des pores pour les milieux hétérogènes. La valeur de D_h est définie par AUBERTIN (Aubertin et al., 2003) à partir des propriétés granulométrique du milieu étudié.

Équation 2.6 - D_h

$$D_h = [1 + 1.17 \times \log(C_u)] \times D_{10}$$

Avec : C_u [-] le coefficient d'uniformité défini comme le ratio D_{60}/D_{10}

En combinant les équations 2.4, 2.5 et 2.6 avec la loi de JURIN, la remontée capillaire équivalente h_{co} pour les milieux granulaires peut être définie par l'expression suivante, Équation 2.7 - h_{co}, qui est une des expressions fondamentales du modèle KM.

Équation 2.7 - h_{co}

$$h_{co} = \frac{\sigma_{\omega \times \cos(\beta)}}{\gamma_\omega} \times \frac{\alpha}{e \times D_h}$$

Avec : σ_w [M·T^{-2}] la tension de surface de l'eau, β [-] l'angle de contact entre l'eau et la surface du tube (l'angle de contact entre l'eau et le quartz, soit $\beta = 0°$, est utilisée dans le modèle KM) et γ_w [M·L^{-2}·T^{-2}] le poids volumique de l'eau.

h_{co} est approximativement équivalente (au moins pour les sols granulaires) à la hauteur de remontée capillaire au-dessus de la surface libre d'une nappe.

c. Détermination des degrés de saturation S_c et S_a

S_c est obtenu à partir de la courbe granulométrique cumulée et est dominante dans les valeurs de faible succion. S_a est obtenue par une loi d'interaction considérant les attractions de Van der Waals entre les grains et l'eau. Elle devient dominante pour les fortes valeurs de succion. Ces deux paramètres sont définis comme des fonctions de h_{co} et Ψ par les équations suivantes (Aubertin et al., 2003).

Équation 2.8 - S_c

$$S_c = 1 - \left[\left(h_{co}/\Psi\right)^2 + 1\right]^M \times exp\left[-M\left(h_{co}/\Psi\right)^2\right]$$

Équation 2.9 – S_a

$$S_a = a_c \times C_\Psi \times \frac{(h_{co}/\Psi)^{2/3}}{e^{1/3}(\Psi/\Psi_n)^{1/6}}$$

Avec : M [-] un paramètre de distribution, qui est estimé pour les milieux granulaires par la relation $M = 1/C_u$, a_c[-] est un coefficient d'adhésion est peut être considéré constant pour les milieux granulaires (a_c= 0,01), Ψ_n[L] est paramètre de normalisation introduit pour la cohérence des unités ($\Psi_n = 1$ cm quand Ψ est exprimé en cm), enfin, C_Ψ [-] est un coefficient introduit pour forcer la teneur en eau θ à tendre vers 0 quand Ψ atteint la limite de succion à la teneur en eau résiduelle. C_Ψ est défini d'après (Fredlund et Xing, 1994) par la relation suivante.

Équation 2.10 - C_Ψ

$$C_\Psi = 1 - \frac{ln(1 + \Psi/\Psi_r)}{ln(1 + \Psi_0/\Psi_r)}$$

Avec : Ψ_r [L] la succion à la teneur en eau résiduelle (ou succion d'entrée d'eau) et Ψ_0 [L] la succion correspondant à un milieu complètement sec (Ψ_0= 1.10^5 mètre). Pour les matériaux granuleux, Ψ_r est déterminé en utilisant la méthode des tangentes comme décrite dans (Fredlund et Xing, 1994), $\Psi_r = 0.86 \cdot h_{co}^{1,2}$ pour les matériaux grossiers.

2.1.2.3 DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES COEFFICIENTS DE VAN GENUCHTEN

À partir des mesures de porosité et de courbe granulométrique, les paramètres du modèle KM, h_{co} et D_h, ont été estimés pour chaque matériau de la structure perméable (Tableau 2.6). Ces paramètres ont été ensuite utilisés en suivant les équations 2.8 et 2.9 pour estimer S_c et S_a pour différentes valeurs de pression interstitielle. La CRE prédite par le modèle KM a ensuite été tracée à partir de ces différentes valeurs de S_c et S_a en suivant l'équation Équation 2.2.

La CRE décrite par la loi de VAN GENUCHTEN (VGM) a ensuite été ajustée à celle prédite par le modèle KM à l'aide d'un algortime automatique sur tableur pour déterminer les valeurs de α et n qui minimisent l'écart entre les deux courbes. La Figure 2.5 présente les courbes ainsi obtenues pour les pavés en béton drainant, le lit de pose en gravillon et la fondation en gravier. Les paramètres α, n et m optimisés sont présentés sur le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 - Paramètres utilisés pour la description de la CRE des matériaux de la structure perméable et du sol

	θ_s	θ_r	D_{10}	D_{60}	D_h	h_{co}	α	n	m
	%	%	mm	mm	mm	m_{H2O}	m^{-1}	-	-
Béton drainant *(Surface)*	23	1	2,0	4,0	2,70	0,06	29,92	4,69	0,79
Gravillon *(Lit de pose)*	47	0,5	2,2	3,5	2,72	0,03	53,78	4,51	0,78
Gravier *(Fondation)*	40	0,4	3,3	12,0	5,46	0,021	106,63	4,55	0,78
Sable	37	5					4,67	4,45	0,78
Limon	43	10					3,60	1,56	0,36
Argile	45	20					0,48	1,19	0,16

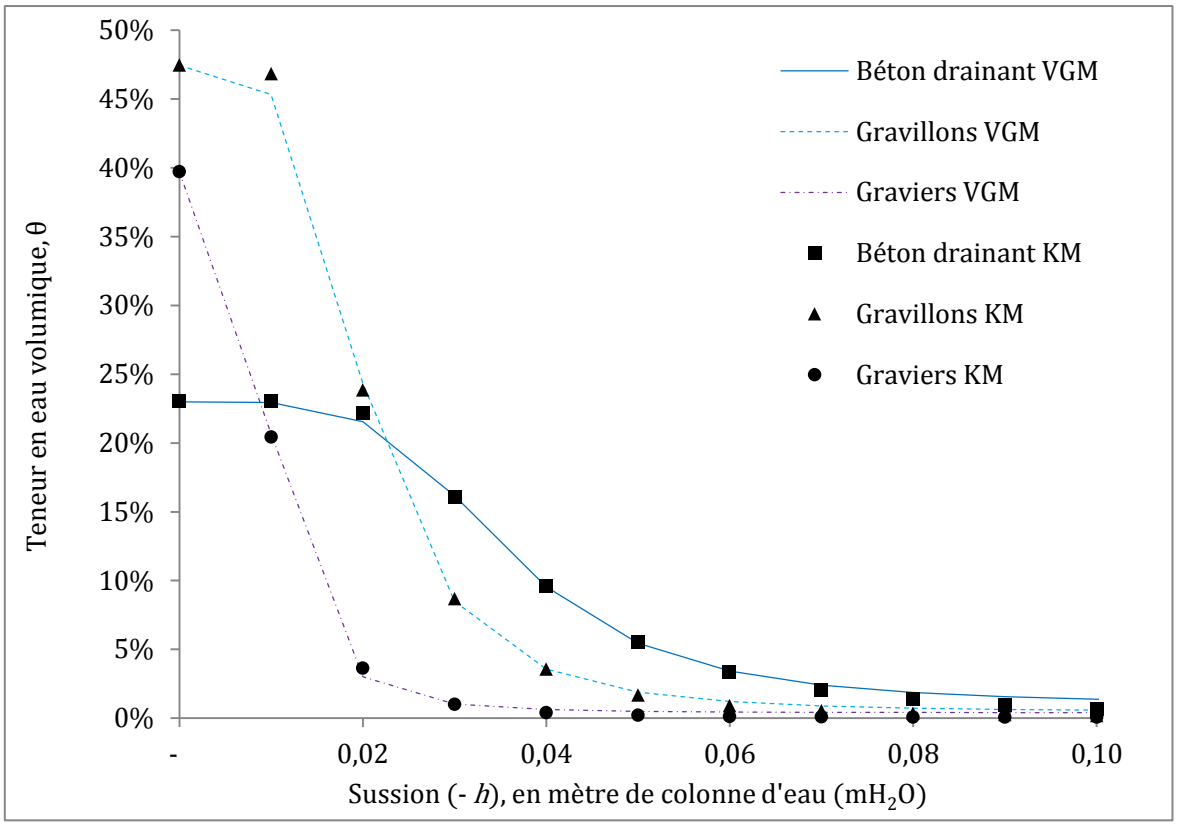


Figure 2.5 – Courbes de rétention d'eau (CRE) décrites par la loi de VAN GENUCHTEN ajustée à partir des points prédits par le modèle de KOVACS modifié (KM).

Concernant les trois profils de sol présentés précédemment, la détermination des paramètres de VAN GENUCHTEN n'a pas été effectuée avec le modèle KM mais a été réalisée à partir d'une synthèse de différentes valeurs de ces paramètres données dans la littérature (Carsel et Parrish, 1988; Chossat, 2005; Ghanbarian-Alavijeh et al., 2010; Van Genuchten, 1980). Les valeurs retenues sont présentées dans le Tableau 2.6.

2.1.3 DESCRIPTION DE LA STRUCTURE RETENUE ET DE SON ENVIRONNEMENT

La modélisation des structures à revêtements perméables dans le modèle PermetAble est construite sur la représentation d'un parallélépipède rectangle (structure) qui repose sur un sol naturel, est en interaction avec une surface contributrice adjacente (site), et est sollicité par des conditions climatiques données (pluviométrie et évaporation potentielle) à un instant donné (conditions initiales).

Les informations qui permettent de décrire la représentation de la structure dans le modèle PermetAble correspondent aux paramètres variables du modèle (largeur, position du drain, etc.). Dans le modèle *PorousCity*, la même structure est représentée mais cette fois-ci de façon plus globale et moins détaillée.

Cette sous-section présente les paramètres utilisés pour la description de la structure (composition et géométrie) et celle du site d'implantation (sol et surface contributrice) dans chacun des modèles. Le Tableau 2.7 synthétise les paramètres utilisés.

Tableau 2.7 - Synthèse des paramètres de description de la structure et de son environnement pour les modèles *PermetAble* et *PorousCity*

	PermetAble	***PorousCity***
	Modèle à base physique à l'échelle de la structure perméable	Modèle multi-agent conceptuel à l'échelle du bassin versant
Composition de la structure	▪ Trois couches (surface, lit de pose, fondation) chacune définies par les paramètres de caractérisation des matériaux (Tableau 2.2) ▪ Présence ou non du drain ▪ Présence ou non d'une géomembrane ▪ Type de sol naturel (générique ou réel) défini par les paramètres de caractérisation des matériaux (Tableau 2.2)	▪ Structure représentée globalement et définie par sa perméabilité de surface. ▪ Présence ou non d'un drain ▪ Type de sol naturel défini par sa perméabilité saturée.
Géométrie de la structure	▪ Longueur (X) ▪ Largeur (Y) ▪ Pente de surface (%) ▪ Épaisseur de chaque couche (Z) ▪ Position verticale (Z) et horizontale (X) du drain ▪ Profondeur du toit de nappe (Z)	▪ Surface (m^2) ▪ Volume de stockage maximum par m^2 (Litres). ▪ Volume égal à la hauteur du drain (en mm) multiplié par la porosité de la fondation.
Génération du ruissellement	Pour chaque surface contributrice (droite et gauche) : ▪ Longueur (X) ▪ Largeur (Y) ▪ Pente de surface (%) ▪ Coefficient de ruissellement (-)	Pour chaque cellule de 1 m^2 ▪ Pente (%) ▪ Interception (mm) ▪ Infiltration (mm/s) ▪ Evaporation (mm/s)

2.1.3.1 COMPOSITION DE LA STRUCTURE

La première série de paramètres variables à définir pour construire une simulation dans le modèle *PermetAble* concerne la composition de la structure et, le cas échéant, celle du sol naturel. La structure est représentée par trois couches, surface drainante, lit de pose et couche de fondation. Les paramètres de ces couches correspondent à ceux présentés précédemment dans la description des matériaux. Les choix concernant la composition résident dans la présence ou non d'un drain, l'utilisation ou non d'une géomembrane imperméable en fond de

structure (absence d'infiltration) et en cas d'infiltration possible, le type du sol naturel présent (sol générique : sable, limon, argile ; ou sol réel).

Dans le modèle *PorousCity* les différentes couches ne sont pas détaillées. La composition de la structure et celle du sol naturel sont décrites par un coefficient de perméabilité de surface (fonction d'entrée), un réservoir de rétention, un réservoir de stockage saturé, et un coefficient de perméabilité du sol. Comme pour le modèle *PermetAble,* il est possible d'inclure ou non l'utilisation d'un drain. Cette représentation conceptuelle de la structure est issue des conclusions de l'exploration du modèle *PermetAble*, présentée au chapitre 3.

2.1.3.2 GÉOMÉTRIE DE LA STRUCTURE

Une fois la composition fixée, la géométrie de la structure et du sol naturel doit être décrite. Pour le modèle *PermetAble,* cette description repose sur les paramètres suivants : longueur, largeur, pente, épaisseur de chacune des couches, position verticale et horizontale du drain, diamètre du drain et profondeur du toit de nappe.

Dans le modèle *PorousCity,* la géométrie est décrite par la surface au sol de la structure (assemblage de cellules de 1 m^2), le volume maximum du réservoir de rétention et le volume maximum du volume de stockage saturé sur 1 m^2 avant évacuation par le drain. Ce volume de stockage à saturation correspond à la hauteur du drain par rapport au fond de la structure multiplié par la porosité de la couche de fondation.

La géométrie et la composition de la structure sont schématisées sur la Figure 2.6.

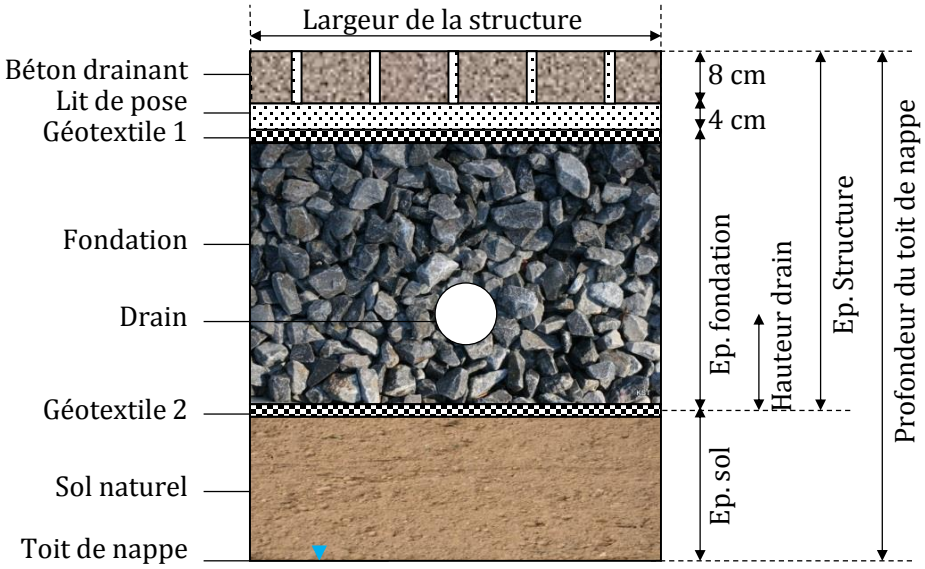


Figure 2.6 – Géométrie et composition de la structure perméable modélisée dans le modèle *PermetAble*

2.1.3.3 SURFACE CONTRIBUTRICE ET RUISSELLEMENT

En complément de la description de la composition et de la géométrie de la structure, la modélisation d'une structure à revêtements perméables nécessite la description des éventuelles surfaces contributrices qui vont générer un ruissellement vers la structure. Il s'agit ici de construire une estimation de la conversion Pluie-Débit. Dans le modèle *PermetAble,* cette transformation Pluie-Débit n'est pas spatialisée, une valeur unique est calculée à partir des

paramètres renseignés et elle est appliquée comme une condition de flux entrant dans la structure. Les paramètres suivants sont ainsi définis pour chaque surface contributrice (surface de droite et/ou surface de gauche) : la longueur, la largeur, la pente, le coefficient de ruissellement.

Dans le modèle *PorousCity*, la génération du ruissellement est spatialisée, elle est modélisée à partir de la pente et des propriétés de chaque type de revêtements qui sont définis par une valeur d'interception, d'infiltration et d'évaporation.

a. Modélisation de la transformation pluie-débit

La conversion pluie-débit nécessite de définir et de prendre en compte les pertes initiales et continues (Cosandey et Robinson, 2000) pour passer d'une hauteur d'eau précipitée (*Hp*) à une hauteur d'eau ruisselée (*Hr*). Ces pertes correspondent au volume d'eau retenu par interception, pertes initiales (*PI*), ou évacuées par infiltration et évaporation, pertes continues (*PC*), comme cela a été présenté au chapitre 1.

Différents modèles (modèle de HORTON, modèle de HUMBERT et NAJJAR, etc.) cherchent à établir des relations statistiques entre les pertes mesurées et les caractéristiques des précipitations. Les pertes initiales correspondent généralement à une hauteur fixe d'interception. Les pertes continues peuvent quant-à-elles être constantes ou variables. En cas de pertes variables, il est généralement admis d'utiliser un coefficient dit de ruissellement, *Cr* [-]. Ces modélisations sont illustrées par les figures 2.7 et 2.8.

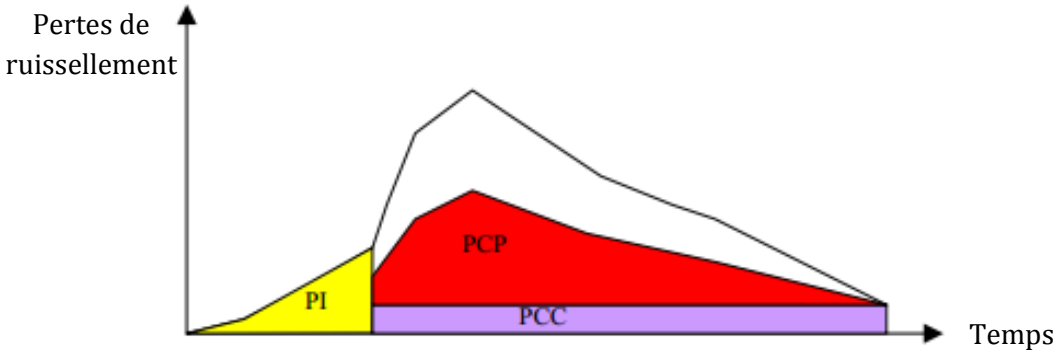


Figure 2.7 - Représentation des différentes modélisations des pertes de ruissellement (CERTU, 2003)

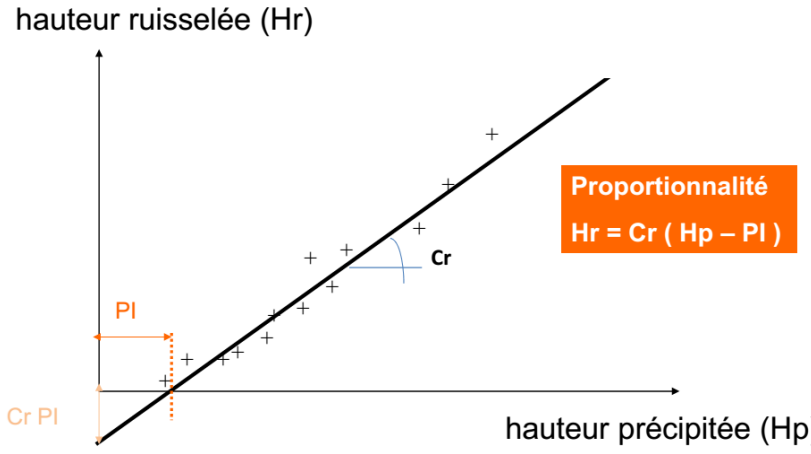


Figure 2.8 - Modélisation des pertes par coefficient de ruissellement (Barraud et al., 2010)

La modélisation des pertes par coefficient de ruissellement est utilisée dans le modèle *PermetAble*. Le débit de ruissellement, Q [$L^3 \cdot T^{-1}$], est ainsi estimé par la relation suivante.

Équation 2.11 – Débit de ruissellement

$$Q = Hr \times S = (Pluie - Interception) \times C_r \times S$$

Avec : la pluie réelle exprimée en mm/m^2/s, l'interception exprimée en mm, le coefficient de ruissellement, C_r [-], qui représente le pourcentage de la pluie efficace (Pluie réelle – interception) qui parvient jusqu'à la structure et S [L^2] qui désigne la surface de la zone contributrice.

À noter que pour améliorer la représentation du débit de ruissellement la prise en compte d'un temps de retard pourrait être intégré. En effet, le ruissellement met un certain temps entre sa génération et son arrivée dans la structure. Compte tenu des ordres de grandeurs considérés dans la modélisation *PermetAble* (surface contributrice de 100 mètres de long au maximum) ce temps de ruissellement n'a pas été pris en compte dans la modélisation.

b. Estimation du coefficient de ruissellement

L'utilisation des coefficients de ruissellement est largement répandue dans la littérature et de nombreux auteurs proposent des valeurs de C_r correspondant à une pluie décennale pour chaque type d'affectation des sols. Dans le cadre de ce travail les valeurs proposées par Sylvie BARRAUD seront utilisées (Barraud et al., 2010) (Tableau 2.8).

Tableau 2.8 - Exemples de valeurs de coefficient de ruissellement en fonction de l'affectation des sols. D'après (Barraud et al., 2010)

Affectation des sols	Coefficient de ruissellement décennal
Espaces vers aménagés	0,25 à 0,35
Habitat individuel	0,40 à 0,52
Habitat collectif	0,57 à 0,70
Équipements publics	0,65
Zones d'activités	0,70
Supermarchés	0,80 à 0,90
Parkings et chaussées	0,95

À noter que l'utilisation d'un coefficient de ruissellement unique, quelle que soit l'intensité de la pluie, ne représente pas fidèlement la génération du ruissellement. En effet, une pluie très intense va avoir une dynamique plus rapide, elle sera moins impactée par le type de revêtement de surface, elle subira moins de pertes et donc provoquera un ruissellement plus important.

Pour améliorer le modèle par coefficient de ruissellement, Sylvie BARRAUD propose l'utilisation de différents (trois) coefficients de ruissellement adaptés à l'intensité de la pluie (Barraud et al., 2010) (Figure 2.9). Cet ajustement du coefficient de ruissellement n'est pas utilisé dans le modèle PermetAble puisque les simulations représentent des simulations fictives pour lesquelles la valeur du coefficient de ruissellement utilisée est un paramètre pris par défaut. En revanche, un tel ajustement serait important à prendre en compte si le modèle est utilisé pour représenter un site réel.

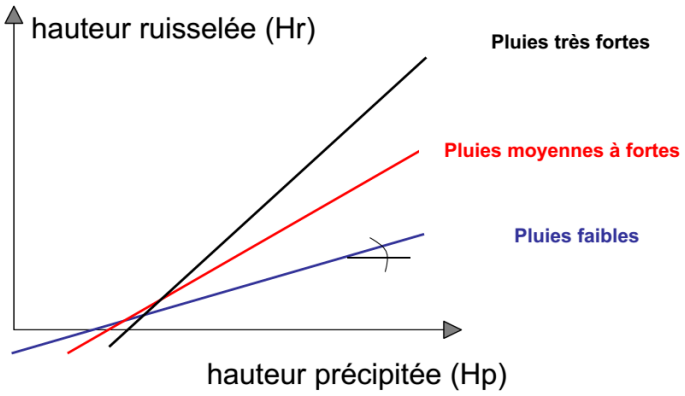


Figure 2.9 - Amélioration du modèle de représentation du ruissellement avec l'utilisation de trois coefficients différents en fonction de la pluviométrie (Barraud et al., 2010)

c. Estimation de l'interception

Dans le cas de surface dites imperméables (bitume, béton, etc.), l'interception s'effectue majoritairement au début de la pluie, via les dépressions présentes à la surface du sol. Cette interception initiale peut être amplifiée par le fait que certaines surfaces, par exemple les revêtements de routes, peuvent accumuler de l'énergie fournie par le rayonnement solaire sous forme de chaleur, immédiatement disponible pour l'évaporation (CERTU, 2003).

Cette interception initiale dépend de nombreux facteurs, les principaux étant la nature du revêtement de surface, son taux d'humidité au début de la pluie et la pente moyenne de la surface contributrice (CERTU, 2003). Ce dernier paramètre étant facile à mesurer, CHOCAT propose un modèle d'estimation de l'interception initiale en fonction de la pente moyenne (Chocat, 1978).

Si P(pente) ≤ 3 % : $Interception = a + b \cdot (3 - P)$

Si P(pente) > 3 % : $Interception = a$

Avec, pour les terrains imperméables : $a = 0{,}5$ mm et $b = 1$ mm,
pour les terrains perméables : $a = 2$ mm et $b = 4$ mm.

Pour le modèle *PermetAble* une valeur d'interception unique est utilisée puisque la zone contributrice n'est pas directement modélisée. Pour le modèle *PorousCity* l'interception est également représentée par un coefficient unique dans le cadre de ce travail. Cependant, la connaissance de la pente à chaque point du modèle rend théoriquement possible l'utilisation du « modèle de CHOCAT » en ajustant la valeur des coefficients a et b pour tenir compte de la diversité des types de revêtements rencontrés.

SECTION 2.2

2.2 EXPÉRIENCES QUANTITATIVES SUR BANC D'ESSAI EN LABORATOIRE

Le calage et la vérification du modèle *PermetAble* nécessitent des données expérimentales à l'échelle de la structure perméable. Dans le cadre de ce travail, ces données ont été produites grâce à un dispositif expérimental en laboratoire, un banc d'essai représentant une structure à revêtements perméables à l'échelle 1. Cette section présente le dispositif, les instruments de mesures utilisés et les différents essais réalisés. Une première analyse des résultats obtenus termine cette section.

2.2.1 PRÉSENTATION DU BANC D'ESSAI

Le dispositif utilisé est inspiré d'études similaires dans la littérature (Illgen et al., 2007; Monrose, 2017). Il se présente comme une structure en assemblage métallique qui inclut un bac vitré pour accueillir la structure simulée, un simulateur de pluie avec un réservoir d'eau, un bac pour récupérer le débit sortant par infiltration et un bac pour récupérer le débit sortant par le drain.

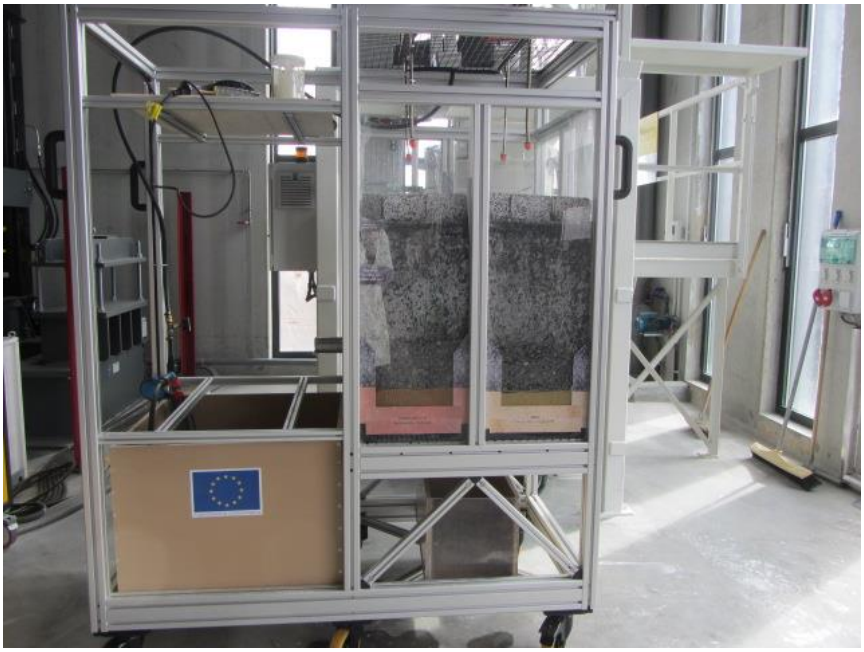


Figure 2.10 - Photo du banc d'essai utilisé pour l'obtention des données expérimentales de calage et vérification du modèle *PermetAble*.

2.2.1.1 STRUCTURE SIMULÉE

Un bac vitré de 70 cm par 70 cm sur 1 mètre de hauteur permet de réaliser la structure à simuler. Cette structure se compose d'une couche de fondation d'épaisseur variable, d'un géotextile filtrant, d'un lit de pose de 4 cm et d'une couche de surface en pavés perméables. En cas de simulation de l'infiltration, la structure perméable repose sur une couche de sol, elle-même placée sur une plaque perforée permettant l'évacuation de l'eau. En cas d'absence d'infiltration, une géomembrane imperméable est placée au fond de la structure pour empêcher

toute infiltration. Le drain peut être placé à une hauteur variable dans la structure, il est composé d'un tube en PVC perforé qui traverse toute la largeur de la structure et son évacuation est réalisée sur une des faces du bac.

(a) (b) (c)

Figure 2.11 – Photos de détail du banc d'essai. (a) Photo de la structure simulée dans le banc d'essai (b) Photo de la plaque permettant de placer le drain (c) Photo du dessus des pavés en cours d'installation sur le lit de pose.

2.2.1.2 SIMULATEUR DE PLUIE

Un ensemble de neuf buses d'aspersion de type jardinage est placé au-dessus de la structure. Il est alimenté par une pompe dont le débit de sortie est divisé en deux. Deux vannes permettent de régler le débit de chacune des sorties. La pression de la pompe vers le dispositif d'aspersion est mesurée par un manomètre. Le deuxième débit de sortie de la pompe est soit refoulé vers le bac de réserve d'eau, soit utilisé pour simuler un ruissellement dans la structure. Le débit d'eau envoyé vers la structure est suivi par des mesures en continu de la hauteur d'eau dans le réservoir via un piézomètre.

(a) (b)

Figure 2.12 – Photos du simulateur de pluie. (a) Photo de l'ensemble du dispositif (b) Photo de la sortie de la pompe.

À noter que le débit en sortie de la pompe varie légèrement en fonction de la hauteur d'eau présente. Lors des essais de l'eau est régulièrement ajoutée dans le bac pour compenser l'eau pompée. Le débit d'entrée n'est ainsi jamais parfaitement stable mais a un profil en dents de scie.

2.2.1.3 INSTRUMENTS DE MESURE

Le schéma (Figure 2.13) représente la structure et l'ensemble des instruments de mesures utilisés. Ces instruments sont détaillés ci-dessous.

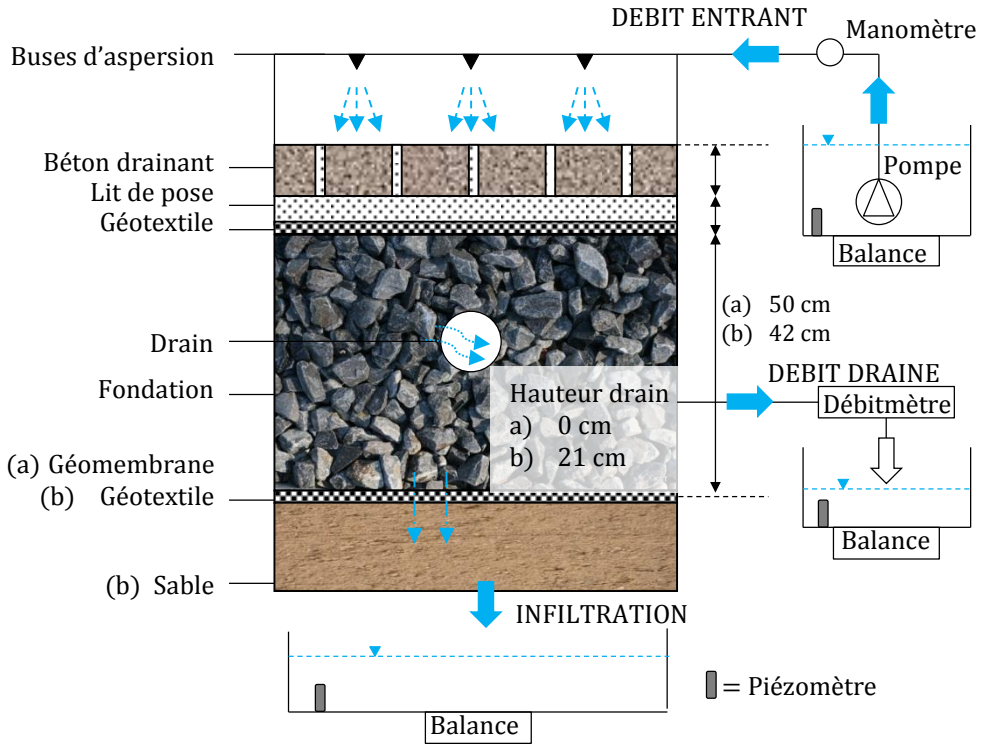


Figure 2.13 - Schéma de présentation du banc d'essai et des instruments de mesures utilisés

- **Mesure du débit entant :** par mesure en continu du volume d'eau dans le réservoir via un piézomètre. Cette mesure est contrôlée par le suivi du volume d'eau initial, ajouté et final dans le réservoir. Le manomètre est utilisé comme instrument de réglage du débit de pluie souhaité via le calage de la courbe pression/débit.

  En cas de simulation d'un ruissellement, le débit ruisselé est préalablement calibré et ajusté à l'aide de la vanne du tuyau de refoulement. C'est la somme débit ruisselé plus débit de pluie qui est alors mesuré par le piézomètre.

- **Mesure du débit sortant par infiltration :** par mesure en continu du volume d'eau dans le bac d'infiltration via un piézomètre. En cas d'infiltration importante deux bacs sont utilisés avec chacun un piézomètre. Cette mesure est contrôlée par le suivi du volume d'eau initial, retiré et final du ou des bacs d'infiltration.

- **Mesure du débit sortant via le drain :**

  - si absence d'infiltration : le volume drainé peut alors être important. Il est mesuré par un débitmètre de type déversoir en 'V' avec suivi en continu de la hauteur d'eau dans le déversoir ;
  - si infiltration : le volume d'eau drainé est alors trop faible pour une mesure par déversoir. L'eau évacuée par le drain est récupérée dans un bac dont le poids est mesuré en continu par une balance. Cette mesure est contrôlée par le suivi du volume initial et final dans le bac.

- **Mesure du stockage dans la structure :** un tube perforé est placé verticalement dans la structure. Une sonde piézométrique placée à l'intérieur permet la mesure en continu de la hauteur d'eau dans la structure. En cas de présence d'une couche de sol, le bas du piézomètre est situé dans la couche de sol ce qui permet de mesurer la saturation de cette dernière. La mesure de l'eau stockée dans la structure est contrôlée par le calcul de la différence du débit entrant et sortant.

Note sur la qualité des données obtenues. L'utilisation des piézomètres permet un suivi continu de chacun des volumes. Néanmoins ces capteurs sont sensibles aux variations de hauteurs d'eau (même minimes), comme celles provoquées par l'arrivée de l'eau dans les bacs de suivi de l'infiltration ou l'ajout d'eau dans le bac de la pompe. Ces légères ondulations à la surface se retrouvent dans les données expérimentales obtenues. Ainsi les valeurs de volumes (débits cumulés), contrôlées par ailleurs, sont justes mais celles des débits présentent de nombreuses oscillations.

2.2.2 PRÉSENTATION DES ESSAIS RÉALISÉS

Deux séries d'essais ont été réalisées dans le but de produire des données expérimentales pour le calage (noté (a) par la suite) et la vérification (noté (b)) du modèle *PermetAble*. Ces deux séries d'essais sont détaillées ici, l'analyse des résultats est présentée au point suivant.

2.2.2.1 ESSAI DE CALAGE (A)

Comme cela sera détaillé au chapitre3, le calage du modèle PermetAble porte sur le coefficient d'orifice utilisé pour la modélisation du drain et la perméabilité minimum des matériaux de la structure. Pour caler ces paramètres il est nécessaire d'avoir des données expérimentales sur la vitesse d'écoulement de l'eau dans la structure et sur le fonctionnement du drain. Aussi, l'essai dit « de calage » a été construit pour représenter le fonctionnement d'une structure perméable sans infiltration possible pour maîtriser au mieux la mesure des débits sortant et favoriser l'évacuation de l'eau par le drain. Cette configuration permet d'identifier différents indicateurs de vitesse d'écoulement de l'eau et permet de vérifier si le débit drainé modélisé représente bien le débit drainé mesuré.

Structure simulée (a) :

- Pavé : 8cm
- Lit de pose : 4 cm de gravillons 2-6 mm
- Géotextile filtrant entre lit de pose et fondation
- Fondation : 50 cm de graviers 4-25 mm
- Drain situé au fond de la structure
- Géomembrane imperméable en fond de structure (aucune infiltration)
- Condition initiale : structure sèche ($\theta = \theta_r$)

À partir de cette configuration une pluie a été simulée (essai a) avec un débit constant de 0,39 L/min pendant 1 heure 45 min (soit une lame d'eau de 83,6 mm [7] de pluie sur la surface de la structure : 0,49 m^2). Cette pluie a été suivie d'une période de drainage de 3 heures.[8] La hauteur

[7] $Lame\ d'eau = (Débit \cdot Durée)/Surface$

[8] Le drainage a été interrompu au bout de 3 heures pour lancer un second essai, avec des conditions initiales maitrisées, dont les résultats n'ont malheureusement pas pu être exploités en raison d'une défaillance des instruments de mesure. Un temps de drainage plus long aurait sinon été privilégié ici.

de lame d'eau simulée visait à représenter des évènements extrêmes de type orageux pour les conditions climatiques locales (d'après les typologies définies à la section 2.4). Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 2.14.

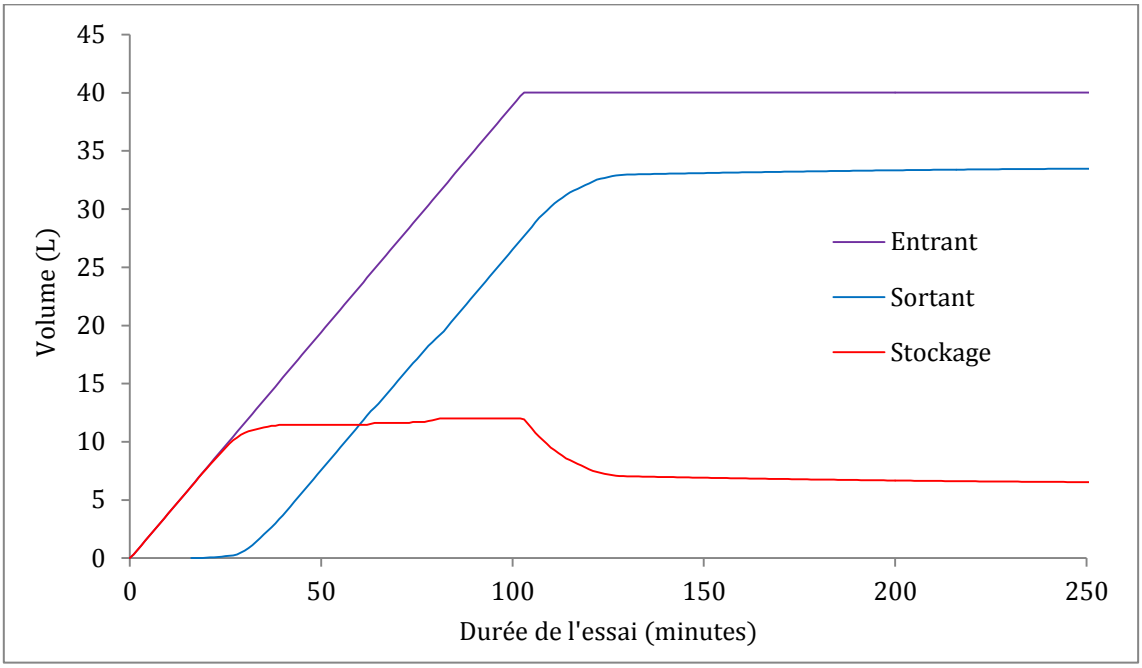


Figure 2.14 - Résultats de l'essai expérimentale de calage (a) du modèle *PermetAble*

2.2.2.2 ESSAIS DE VÉRIFICATION (B)

La série d'essais dit « de vérification » a été réalisée dans le cadre de l'encadrement d'un travail de recherche d'élèves en dernière année du cycle ingénieur à l'ESITC Caen (Bouget et al., 2018). La structure a été choisie dans le but d'explorer différents régimes de fonctionnement différents à partir d'une même configuration.

Structure simulée (b) :

- Pavé : 8cm
- Lit de pose : 4 cm de gravillons 2-6 mm
- Géotextile filtrant entre lit de pose et fondation
- Fondation : 42 cm de graviers 4-25 mm
- Drain situé 22 cm au-dessus du fond de la structure
- Géotextile filtrant entre la fondation et le « terrain naturel »
- Une couche de « sol » composée de 12 cm de sable de perméabilité $5{,}5 \cdot 10^{-4}$ m/s.
- Condition initiale : matériaux humidifiée ($\theta = \theta_c$)

Quatre essais indépendants ont été réalisés avec cette configuration. Ces essais mettent en jeu des quantités d'eau importantes, bien supérieures à toute pluie réaliste. Contrairement à l'essai de calage l'objectif ici était de tester les processus hydrologiques de la structure et non de représenter son comportement dans une situation réaliste. L'essai b1 est réalisé à débit constant. L'essai b2 est réalisé à débit constant avec simulation d'une pluie directe plus un ruissellement. L'essai b3 est réalisé à débit variable sans ruissellement. Enfin, l'essai b4 est réalisé avec un débit de pluie directe et un débit de ruissellement simulé variable. Le détail des volumes d'eau en entrée pour chaque essai est donné dans le Tableau 2.9.

Tableau 2.9 - Détail des essais expérimentaux de vérification (b1, b2, b3 et b4) du modèle *PermetAble*

	Débit moyen	**Durée**	**Volume d'eau entrant total**	**Lame d'eau sur la surface de la structure**
	L/min	*min*	*Litres*	*mm*
Essai b1	Direct : 6,70	37	Direct : 248	Direct : 506
Essai b2	Direct : 4.35 Ruissellement : 5,90	20	Direct : 87 Ruissellement : 118	Direct : 178 Ruissellement : 240
Essai b3	Direct : moyen 5.84	Total : 98	Direct : 573	Direct : 1168
Essai b4	*Partie 1* Direct : 5,25 Ruissellement : 3,00 *Partie 2* Direct : 2,70 Ruissellement : 12,60	*Partie 1* : 32 *Partie 2 :* 5	Direct : 181 Ruissellement : 159	Direct : 369 Ruissellement : 324

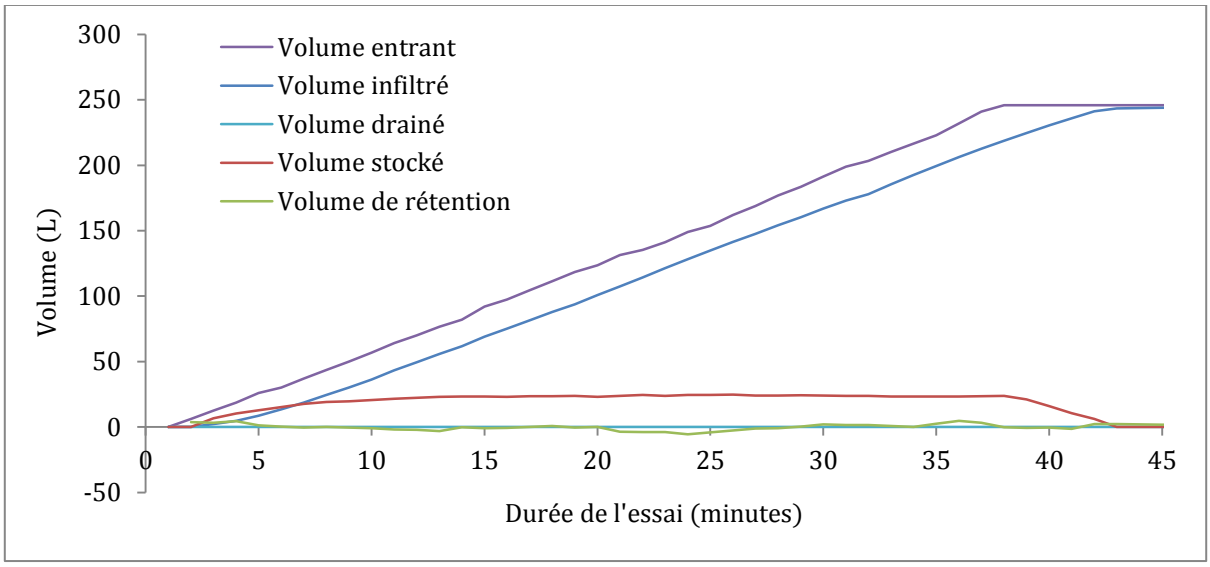


Figure 2.15 - Résultats de l'essai expérimental de vérification (b1) du modèle *PermetAble*

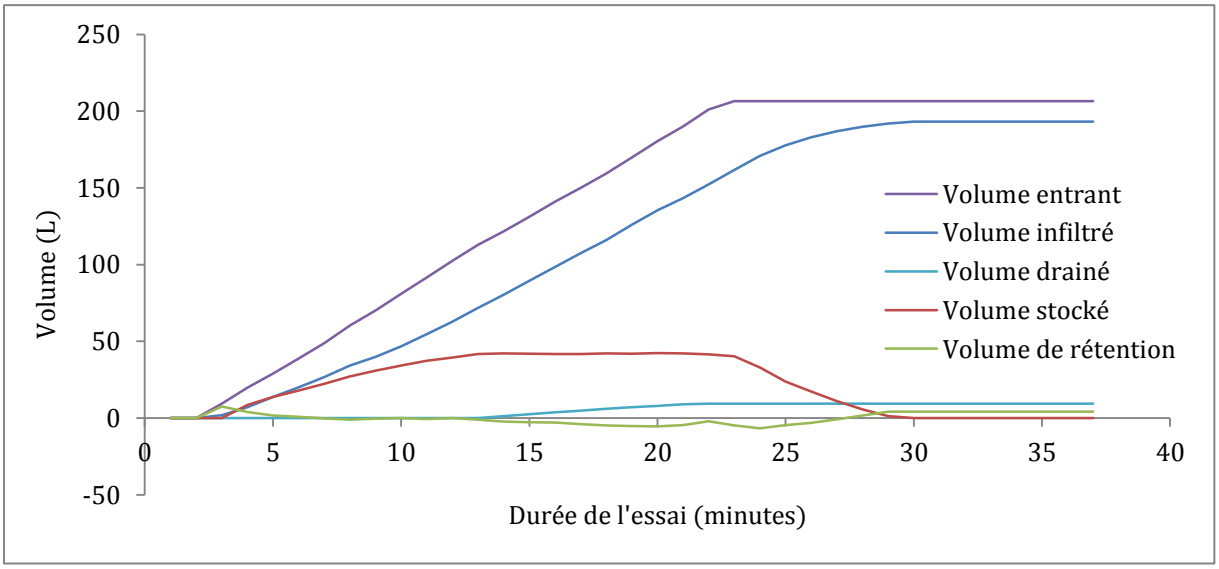


Figure 2.16 - Résultats de l'essai expérimental de vérification (b2) du modèle *PermetAble*

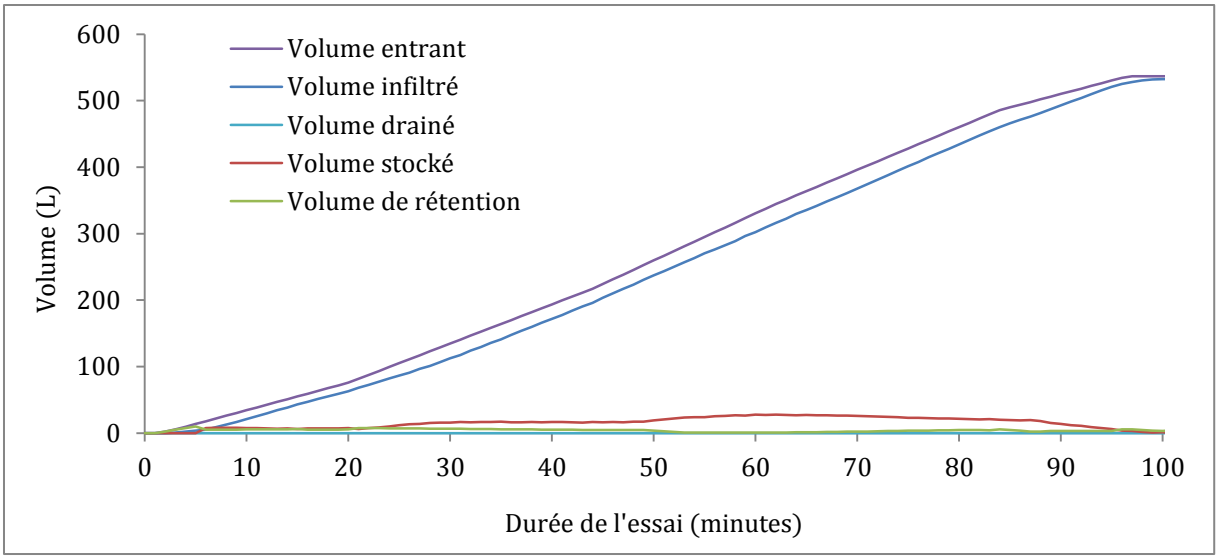


Figure 2.17 – Résultats de l'essai expérimental de vérification (b3) du modèle *PermetAble*

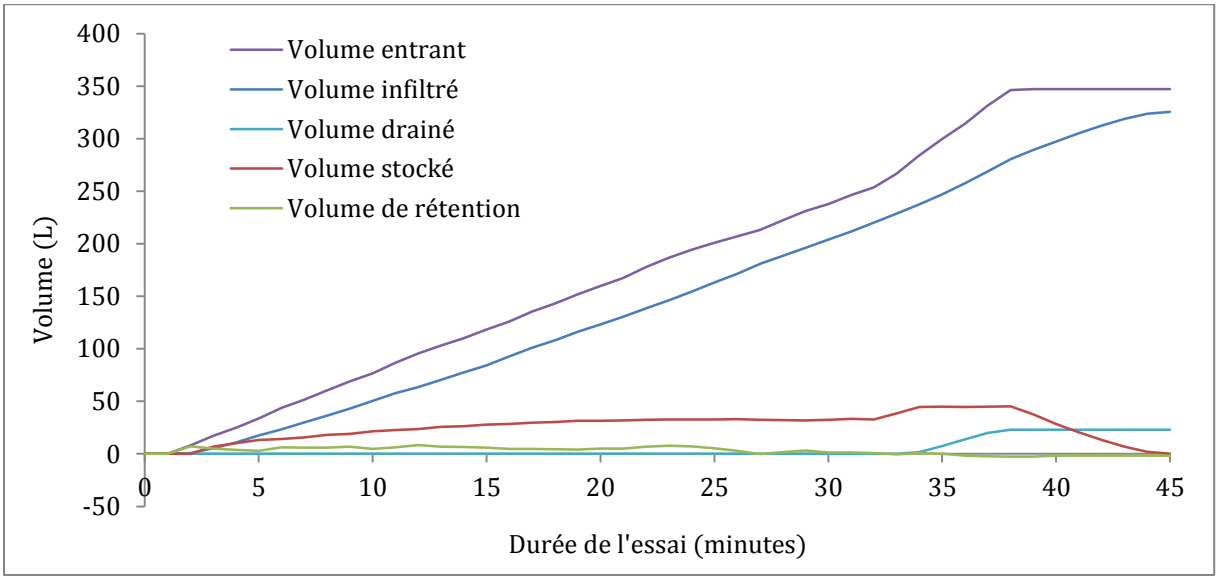


Figure 2.18 - Résultats de l'essai expérimental de vérification (b4) du modèle *PermetAble*

2.2.3 ANALYSE DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les essais réalisés avec le banc d'essai sont analysés et présentés ici, d'une part pour illustrer le fonctionnement d'une structure perméable dans différentes configurations, d'autre part en vue de préparer les étapes de calage et vérification. Les résultats présentés ici sont exploités au chapitre 3 avec la confrontation des données expérimentales et modélisées.

2.2.3.1 ESSAI DE CALAGE (A)

L'essai de calage présente une dynamique très simple. Puisque le drain est le seul exutoire possible, il est normal de trouver un débit de drainage égal au débit d'entrée après un certain temps de mise en charge de la structure. Le principal enjeu du calage du modèle *PermetAble* étant la juste représentation de la dynamique de percolation de l'eau dans la structure (temps de percolation, de drainage, et volume d'eau de rétention) l'analyse de cet essai se concentre notamment sur les différents décalages temporels entre le débit d'entrée et de sortie. Quatre deltas temporels (Δt) peuvent ainsi être quantifiés, ils sont représentés sur la Figure 2.19.

- **Δt « de percolation » (Δt_p) :** correspond au temps nécessaire pour l'eau pour atteindre le drain et provoquer un écoulement. Δt_p = 15 min.
- **Δt « de régime permanent » (Δt_{rp}) :** correspond au temps nécessaire pour atteindre le régime permanent correspondant à un débit drainé égal au débit d'entrée. Δt_{rp} = 38 min.
- **Δt « d'inflexion » (Δt_i) :** correspond au temps entre la fin de la pluie et le début de la diminution du débit drainé. Δt_i = 3 min.
- **Δt de drainage (Δt_d) :** correspond au temps nécessaire pour le drainage de l'eau par le drain après l'arrêt de la pluie. Δt_d = 26 min.

Le volume stocké a été calculé comme la différence du volume entrant et sortant (il ne s'agit donc pas d'une valeur mesurée). La représentation du volume stocké sur la Figure 2.19 met en évidence que tout le volume d'eau entrant n'est pas drainé par la structure. Trois explications peuvent être apportées. La première est qu'une lame d'eau reste « piégée » au fond de la structure et ne parvient pas à être évacuée par le drain. Ce volume « mort » est compris entre 0,25 et 0,5 litre au maximum. La seconde est qu'une partie de l'eau entrant a permis d'humidifier les pavés, gravillons et graviers. Ce volume d'eau, appelé « eau de rétention » par la suite, est retenu par capillarité et ne s'écoule donc pas jusqu'au drain. Enfin, la fin du drainage de l'eau par le drain a été mesurée lors de l'arrêt d'un écoulement continu au niveau du drain (la mesure ne pouvant alors plus être assurée avec le débitmètre). Cependant, le drain a continué d'évacuer de l'eau sous la forme d'un goutte à goutte pour un total de 1,5 litre.

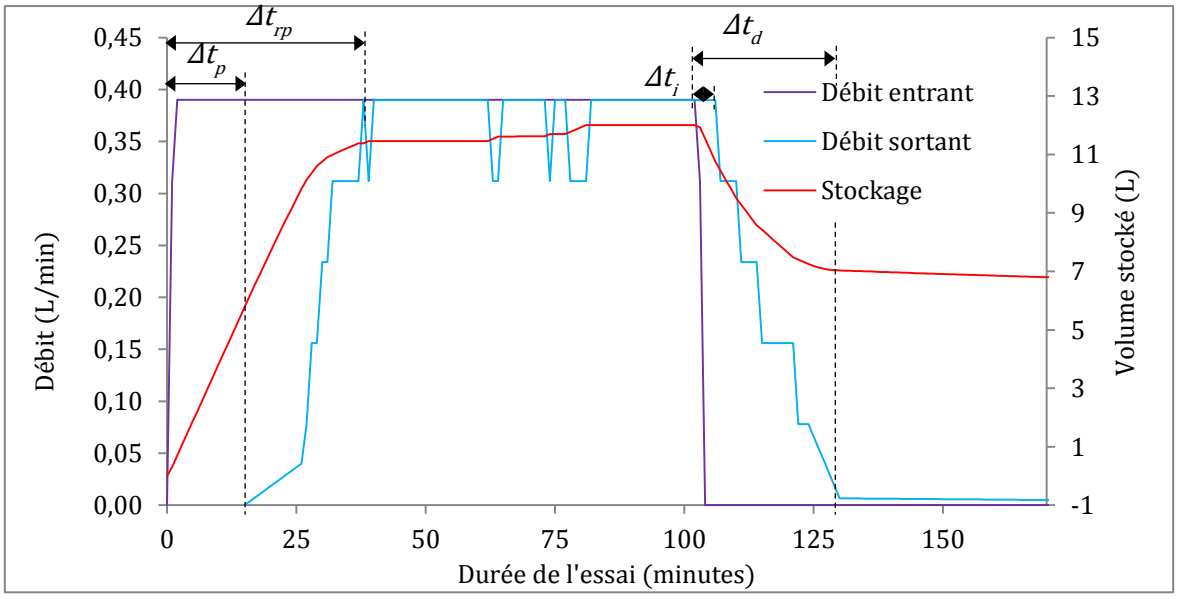


Figure 2.19 – Essai de calage (a) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps

Le volume « stocké » ($V_{stocké}$) en fin d'essai peut être décomposé ainsi : $V_{stocké}$ = 7,0 litres dont entre 0,25 et 0,5 litres de volume « mort », et 1,5 litres à évacuer par goutte à goutte. Ce qui permet d'estimer le volume d'eau de rétention à l'intérieur de la structure entre 5,0 et 5,5 litres. Ce volume de rétention correspond à la quantité d'eau liée à la matrice solide dans les différentes couches. La modélisation de cet essai permet de retrouver ce volume et montre que cette rétention intervient dans les deux couches de surface (béton drainant et lit de pose) dont la taille des pores est plus faible que celle de la couche de fondation. Cette observation est étudiée et détaillée dans le chapitre 3.

2.2.3.2 ESSAIS DE VÉRIFICATION (B)

Les essais de vérification prennent en compte l'infiltration et un drain situé à une hauteur h_{drain} = 21 cm du fond de la structure qui a un rôle de surverse. L'observation des résultats des différents essais permet de montrer que l'écoulement à l'intérieur de la structure et l'évacuation de l'eau présentent différents régimes possibles en fonction de la valeur du débit entrant par rapport au coefficient de perméabilité du sol.

- **Régime 1**. Si $Q_e < K_{sol}$: $Q_{s\_inf} = Q_e$ en régime permanent, pas de stockage
  Le débit entrant (pluie plus ruissellement) est inférieur à la perméabilité saturée du sol, tout l'écoulement est donc évacué par infiltration sans mise en charge dans la structure.
- **Régime 2**. Si $K_{sol} < Q_e < K_{sol}\, h$, avec $h < h_{drain}$: $Q_{s\_inf} = Q_e$ en régime permanent ; stockage sur une hauteur h au fond de la structure, soit $V_{stocké} = h \cdot 0{,}7^2 \cdot n_{fondation}$.
  Le débit entrant (pluie plus ruissellement) est supérieur à la perméabilité saturée du sol, l'excédent d'écoulement s'accumule au fond de la structure. Cette accumulation conduit à une augmentation du débit d'infiltration qui suit la loi de DARCY ($Q = K \cdot \text{grad}(h+z)$ soit dans le cas présent $Q_{s\_inf} = K_{sol} \cdot h$). Le stockage se stabilise ainsi à une hauteur h correspondent à $Q_{s\_inf} = Q_e$.
- **Régime 3**. Si $K_{sol} \cdot h_{drain} < Q_e$: $Q_e = Q_{s\_inf} + Q_{s\_drain}$; $Q_{s\_inf} = K_{sol} \cdot h_{drain}$; $Q_{s\_drain} = Q_e - Q_i$; stockage sur une hauteur h_{drain} au fond de la structure, soit $V_{stocké} = h_{drain} \cdot 0{,}7^2 \cdot n_{fondation}$.
  Le débit entrant (pluie plus ruissellement) est supérieur au débit d'infiltration quand $h = h_{drain}$. L'eau atteint la base du drain et l'excédent d'écoulement est évacué par le drain.

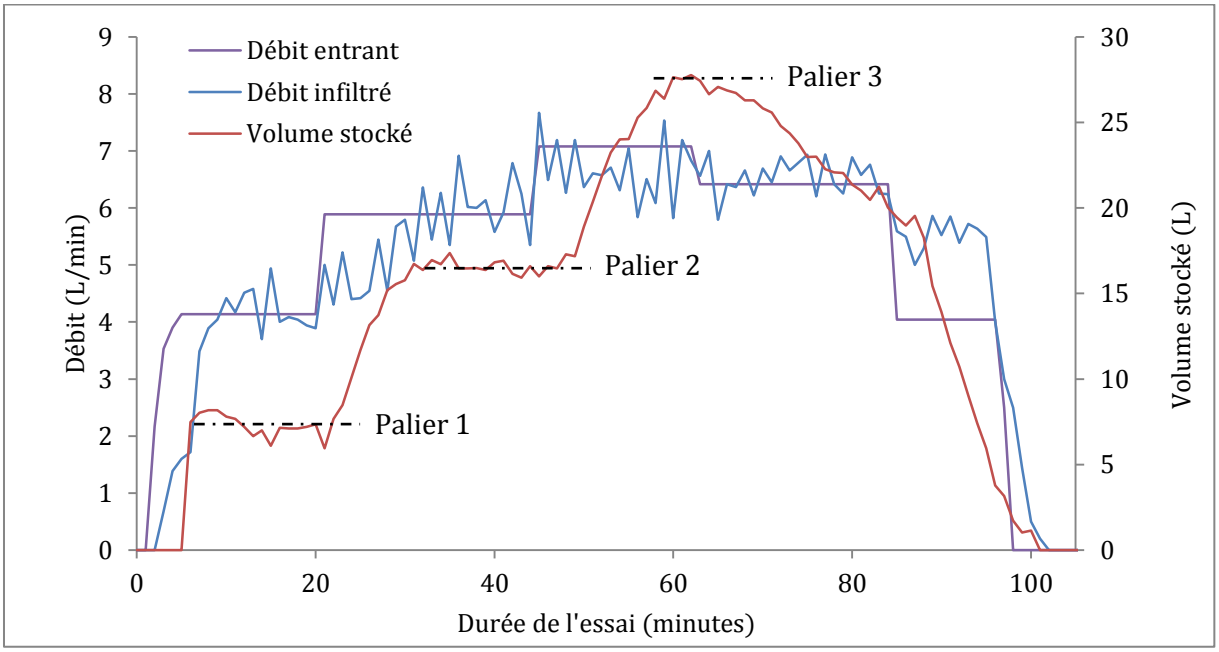


Figure 2.20 - Essai de vérification (b3) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps. *La courbe du débit d'entrée est tracée à partir des débits moyens pour lisser les oscillations et clarifier la lecture.*

Le régime 2 est bien illustré par l'essai (b3) où le débit d'entrée est composé seulement d'une pluie directe avec un débit variable. À chaque variation de débit le stockage évolue dans la structure pour atteindre un nouveau palier d'équilibre $Q_{s\_inf} = Q_e$, (Figure 2.20). Les paliers lors de l'augmentation du débit (montée) sont bien marqués puisque l'équilibre s'établit rapidement après un temps de montée en charge. Les paliers lors de la diminution du débit (descente) sont

moins identifiables. Un temps plus long aurait été nécessaire pour obtenir un régime permanent à chaque variation de débit.

Le passage du régime 2 au régime 3 est visible sur les essais (b2) et (b4). Dans le cas de l'essai (b2) le débit entrant est constant et la montée en charge dans la structure est progressive jusqu'à atteindre le palier $h = h_{drain}$, (Figure 2.21). Dans le cas de l'essai (b4) un premier palier est atteint avec $h < h_{drain}$, puis une seconde augmentation du stockage a lieu lors de l'augmentation du débit d'entrée jusqu'à atteindre le palier $h = h_{drain}$, (Figure 2.22).

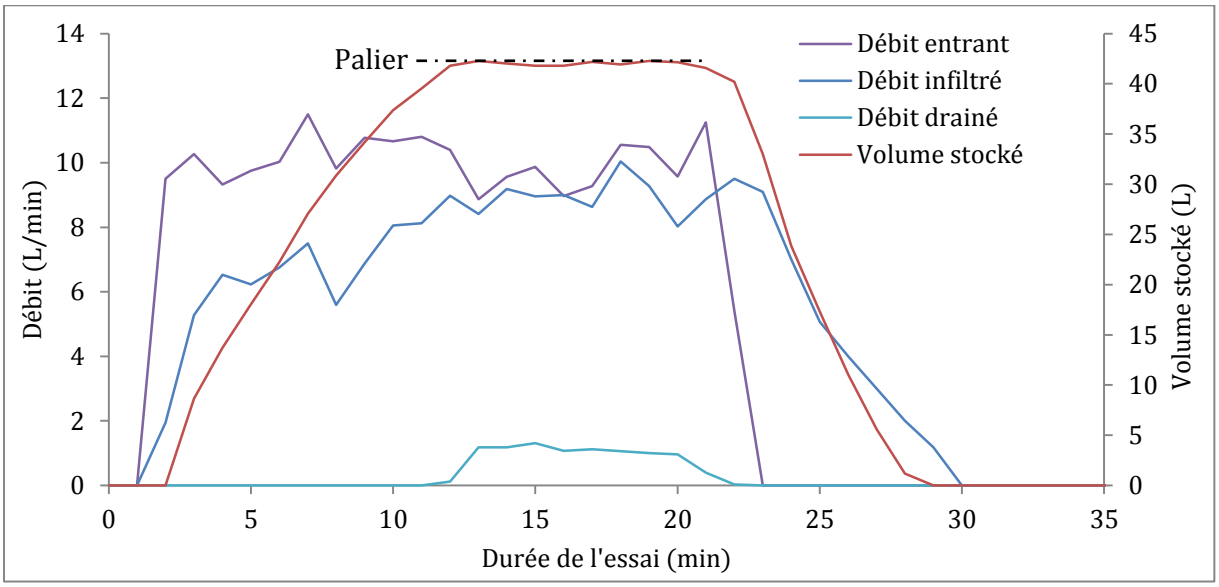


Figure 2.21 - Essai de vérification (b2) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps

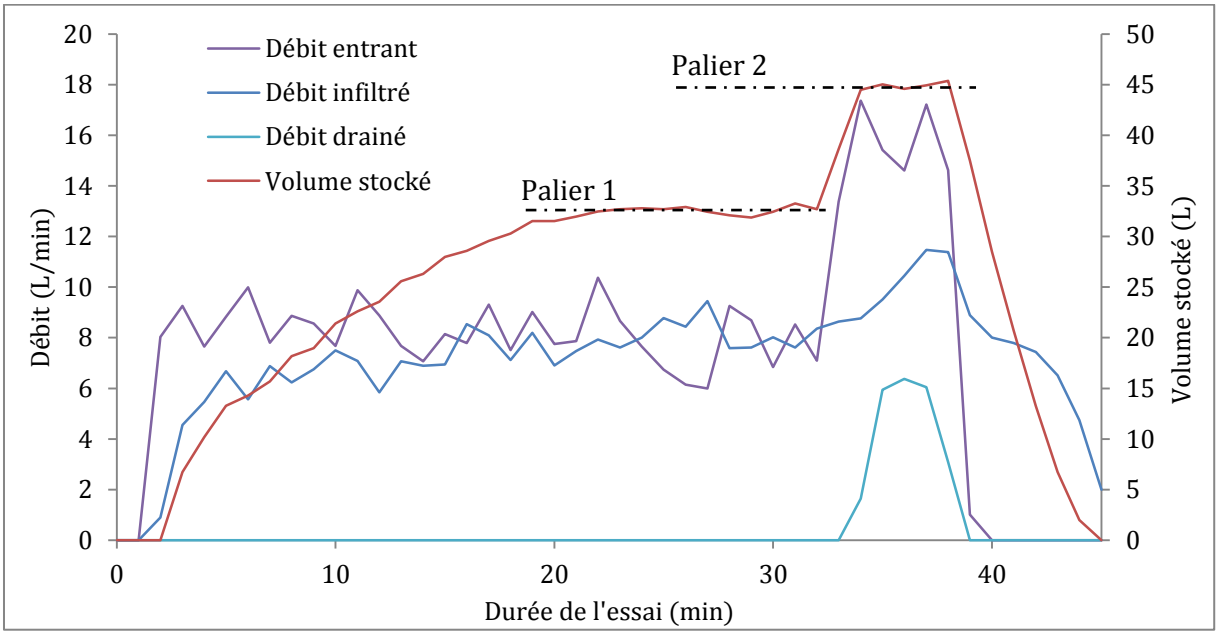


Figure 2.22 – Essai de vérification (b4) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps

Les essais (b2) et (b4) permettent également de mettre en évidence un détail important du fonctionnement du drain. La hauteur mesurée dans le piézomètre est légèrement différente dans les deux cas et surtout elle est systématiquement supérieure à h_{drain} ((b2) : $h_{max} = 26.49$ cm ;

(b4) : $h_{max} = 28.14$ cm). Ainsi, contrairement à l'hypothèse régulièrement admise que la hauteur d'eau maximum est celle correspondant au bas du drain, dans la réalité le niveau d'eau continue de monter jusqu'à ce que la surface mouillée du drain permette d'équilibrer le débit d'entrée par le débit drainé. Autrement dit, une montée en charge existe également au niveau du drain et dans un cas extrême, si le débit entrant est très important et si le débit drainé maximum est faible (drain à débit régulé, saturation aval du réseau), le niveau d'eau pourrait monter au-dessus du drain. Ces observations seront reprises dans le chapitre 3 dans la définition des conditions limites au niveau du drain.

Enfin, les différents deltas temporels mentionnés lors de l'essai de calage se retrouvent dans les différents essais de vérification avec une différence majeure, le temps de percolation est plus court (de 2 à 5 minutes contre 15 minutes lors de l'essai (a)). Cette différence peut s'expliquer par l'épaisseur de graviers plus faible et des conditions initiales différentes. En effet, la structure étant déjà humidifiée lors des essais de vérification les résultats montrent un stockage par rétention d'eau très faible, ce qui s'accompagne par un front de percolation plus rapide. Cette observation permet de souligner l'importance de la description de la teneur en eau initiale pour la modélisation.

2.3 *RIVA BELLA*, SITE D'APPLICATION DU MODÈLE *POROUSCITY*

Le modèle *PorousCity* nécessite des données d'entrée pour décrire le bassin versant modélisé. Comme cela a été expliqué et justifié au chapitre 1, plutôt que de travailler sur un site fictif, il a été choisi de modéliser un bassin versant réel. L'opportunité s'est présentée de pouvoir retenir le quartier *Riva Bella*, situé sur la commune de Ouistreham en Normandie qui présente :

- de multiples enjeux de gestion des eaux pouvant justifier l'usage de revêtements perméables pour répondre à tout ou partie des problèmes rencontrés ;
- des spécificités topographiques, géologiques et hydrologiques intéressantes assez homogènes rendant possible une modélisation assez simple, sans être simpliste ;
- des données d'entrée pour le modèle *PorousCity* déjà disponibles ou bien assez facilement collectées par quelques investigations et observations sur le terrain.

Cette section décrit les données collectées sur ce quartier. Elle s'organise en deux sous-sections. La première, 2.3.1, présente le site d'étude dans son ensemble, pour revenir sur les raisons du choix de ce site, ses particularités, et ses limites. La seconde présente les données collectées pour décrire le site dans le modèle *PorousCity*.

2.3.1 LA COMMUNE DE OUISTREHAM ET SON QUARTIER DE *RIVA BELLA*

2.3.1.1 CONTEXTE PHYSIO-GÉOGRAPHIQUE

La commune de Ouistreham est localisée sur le littoral de la côte de Nacre, et à l'ouest de l'embouchure de l'Orne. La ville de Ouistreham s'est progressivement développée dans une zone basse entre -2 et 5 mètres d'altitude (IGN), limitée au nord par un cordon sableux surmonté d'une dune et au sud, par un talus dominé par un plateau culminant à des altitudes de l'ordre de 50 mètres. Dans le détail, l'espace urbain est encadré à l'est par l'Orne et le canal qui relie Ouistreham à Caen et à l'ouest par le marais de Colleville et ses canaux (Figure 2.23).

La construction du canal (inauguré en 1857) a modifié l'embouchure de l'Orme et a conduit à l'assèchement de l'ancien bras du fleuve, permettant ainsi à la ville de s'étendre, vers le nord et dans les zones basses, au plus près du cordon littoral (Figure 2.25). L'urbanisation sur la dune sableuse s'opère principalement entre 1950 et 1970.

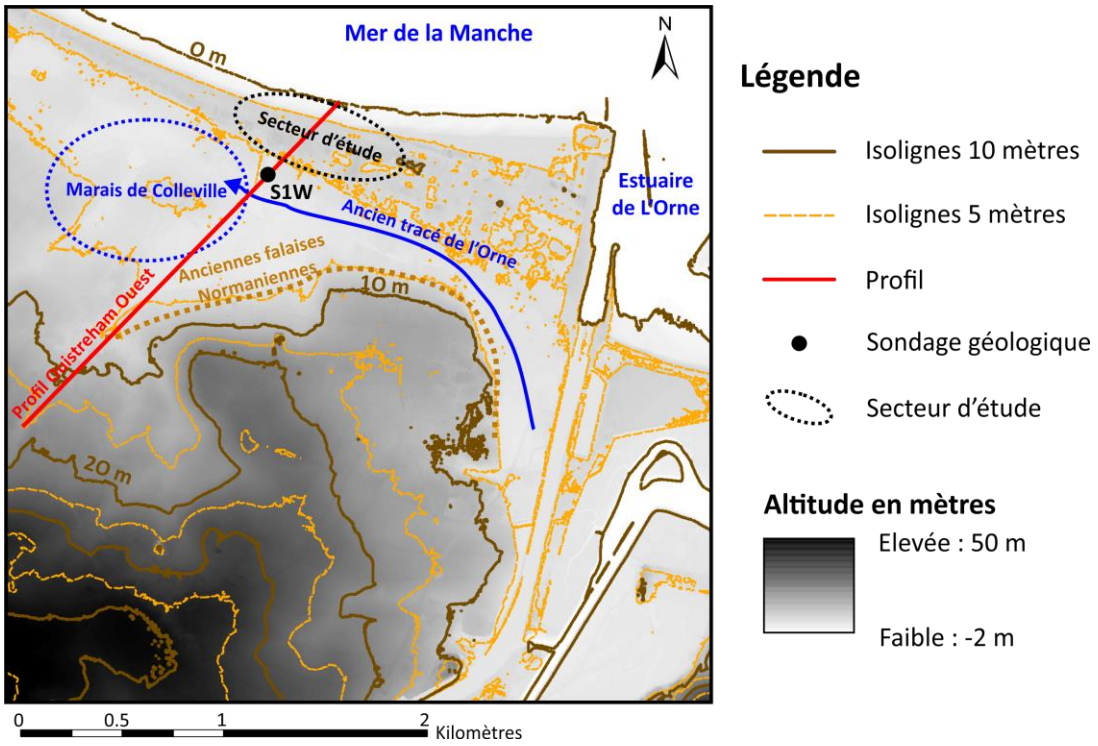
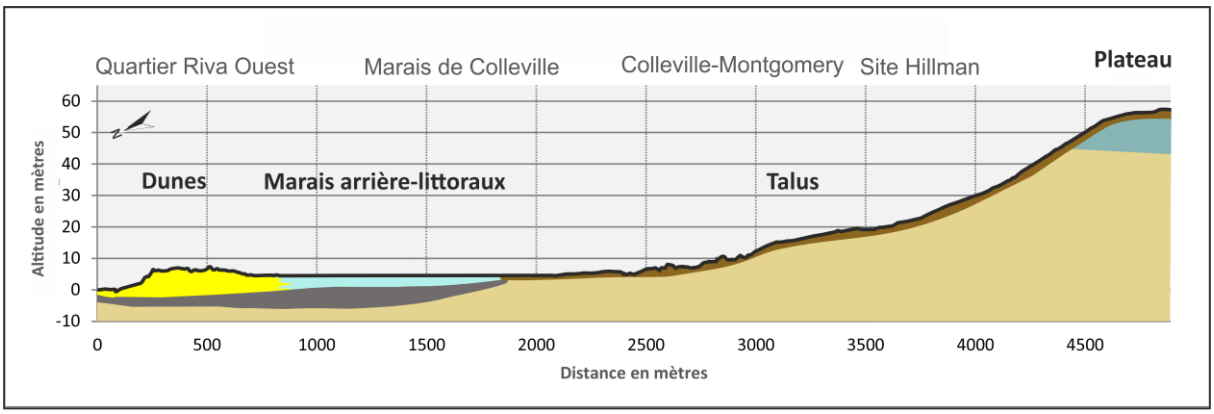
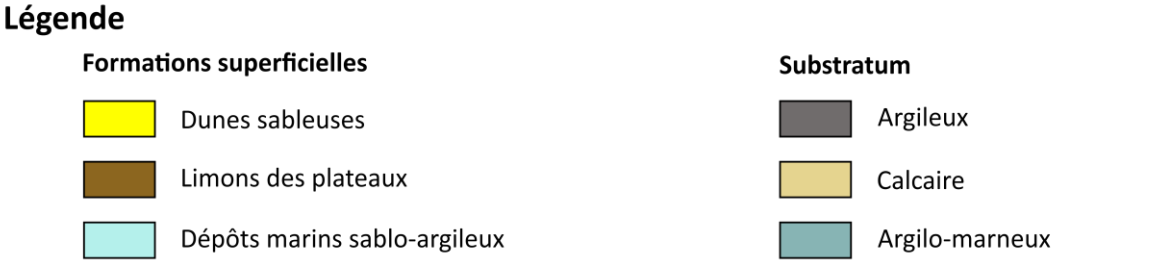


Figure 2.23 - Carte topographique de la commune de Ouistreham, et de localisation des profils et sondages ayant permis la réalisation des coupes géologiques





Auteurs : CARDINAL T., LE DAIN A., SALLENT A.

Sources : *BRGM, Info terre, RGEALTI 5m du 14.*

Figure 2.24 - Coupe du littoral de Ouistreham à Colleville-Montgomery selon un axe Nord-Est Sud-Ouest d'après les données du RGEALTI de l'IGN

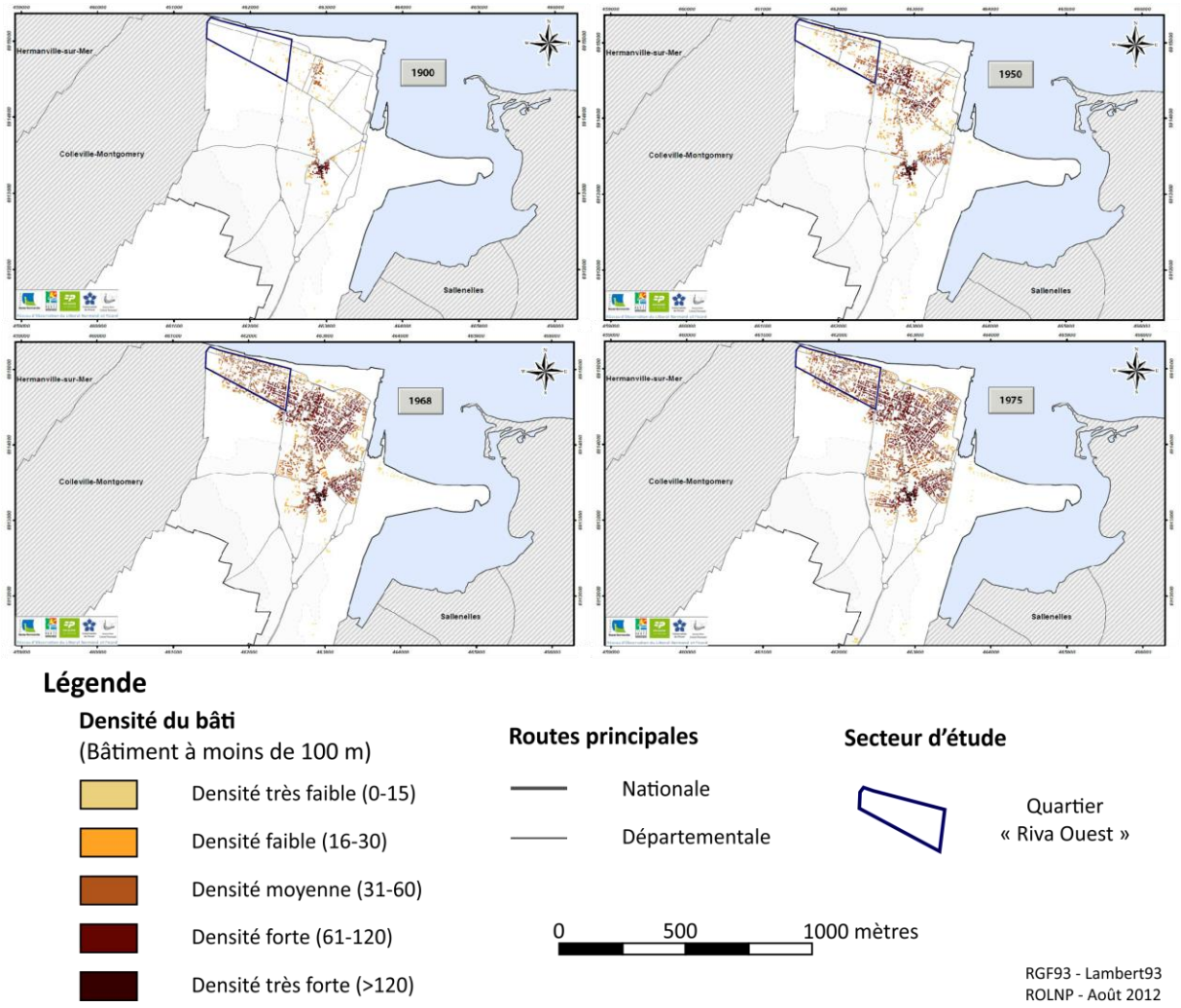


Figure 2.25 - Carte de l'évolution du bâti sur la commune de Ouistreham entre 1900 et 1975

2.3.1.2 CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Au niveau hydrogéologique, la partie haute de Ouistreham (jusqu'au niveau talus) se situe sur le « calcaire de Langrune » au sein duquel se trouve une nappe libre. À l'endroit du talus, l'eau de cette nappe s'infiltre et rencontre une couche d'argiles imperméables. L'eau ne peut alors pas s'infiltrer ce qui explique l'existence du marais de Colleville. L'eau est ensuite évacuée vers la mer via la dune. De nombreux puits sont d'ailleurs aménagés sur les parcelles privées du quartier *Riva Bella* et captent de l'eau douce en provenance de cet écoulement de la nappe. Il n'y aurait donc pas de remontée d'eau marine dans la dune.

Sur la carte des 'Profondeurs de la nappe phréatique en période de très hautes eaux' établie par la DREAL (DREAL Normandie, 2014) (Figure 2.26), la limite du talus est bien visible et la nappe est affleurante ou à moins d'un mètre de profondeur sur l'ensemble de la partie basse de Ouistreham, autour du bras de l'Orne (actuel et ancien) et du marais de Colleville.

À noter que cette représentation cartographique décrit une situation de hautes eaux hivernales, sur l'année 2001 qui est l'année des plus hautes eaux enregistrées localement depuis l'année 1966 (d'après les chroniques du piézomètre de la station de Saint Contest). Dans la réalité, la nappe connait des variations saisonnières, de plusieurs dizaines de centimètres à plusieurs mètres en fonction des endroits.

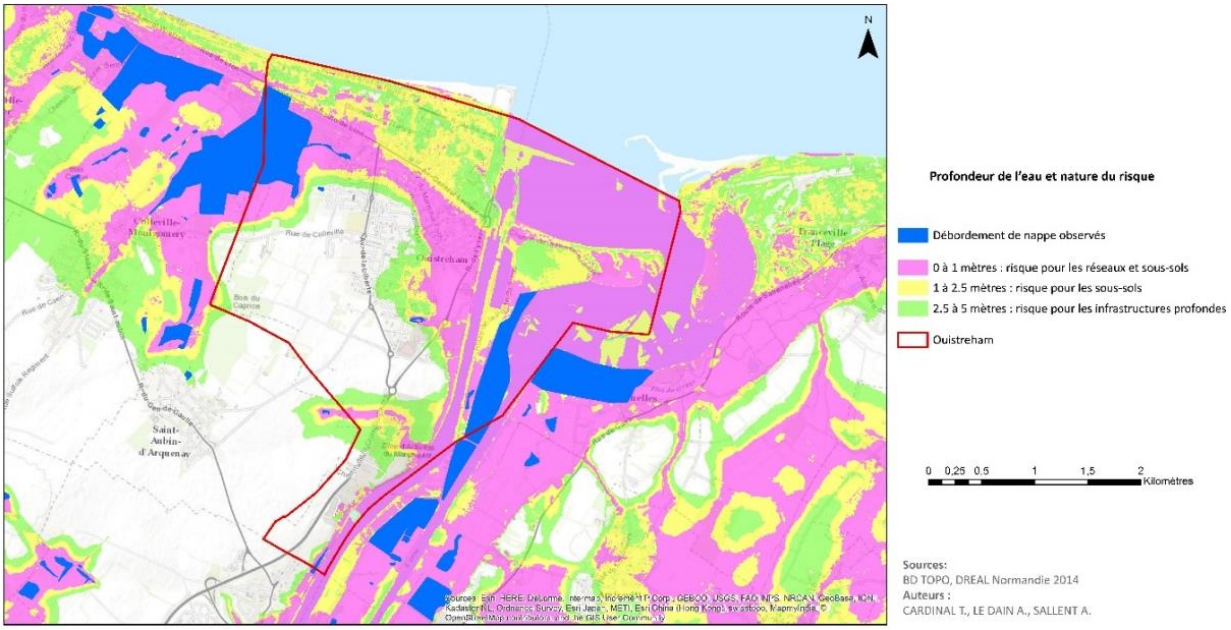


Figure 2.26 - Profondeur de la nappe phréatique en période de très hautes eaux (hiver 2001) sur la commune de Ouistreham (DREAL Normandie, 2014)

2.3.1.3 LES SPÉCIFICITÉS DU SITE DE MODÉLISATION

Le site de modélisation à l'échelle d'un bassin versant correspond à la partie ouest du quartier *Riva Bella* de Ouistreham, dénommée '*Riva Bella'* dans ce travail. Ce quartier correspond à une zone pavillonnaire, localisée à l'extrémité ouest de la ville, sur la dune, entre le front de mer au nord et le marais de Colleville au sud (Figure 2.27).

Ce site d'étude présente comme première spécificité d'être situé sur une dune de sable fin d'une épaisseur minimum de 6 mètres, considérée comme homogène avec une forte perméabilité. En l'absence d'information plus précise sur la structure verticale de la dune, les valeurs de perméabilité sont estimées entre $1{\cdot}10^{-4}$ m/s à $1{\cdot}10^{-5}$ m/s. Cette dune repose sur une couche d'argile imperméable (Figure 2.24)(Carte géologique au 1/50 000ème n°120 - Caen). Une nappe drainant les eaux du marais de Colleville s'écoule, librement et rapidement, vers la mer dans la dune au-dessus de la couche d'argile à une hauteur variant entre 1 et 5 mètres de profondeur en fonction de la topographie et des fluctuations de la nappe.

Seconde spécificité de cette zone, elle ne présente pas de réseaux de collecte des eaux pluviales[9] (Figure 2.27), leur évacuation étant assurée naturellement par infiltration dans la dune ou à l'aide de puits d'infiltration dans les zones imperméabilisées. Cette imperméabilisation est à l'origine de problèmes d'inondations récurrents sur ce quartier.

Ces spécificités ont motivé le choix de ce site en raison de la simplicité de modélisation (un sol homogène et l'absence de réseau de collecte des eaux pluviales), du potentiel intérêt de l'usage des revêtements perméables sur cette zone (enjeux d'inondation par ruissellement de surface, perméabilité du sol élevée).

[9] Selon les informations de la mairie un collecteur d'eau pluviale est présent sur l'extrémité sud-est de la zone étudiée. Dans le cadre de ce travail les avaloirs connectés à ce réseau seront considérés de façon identique à ceux connectés aux puits d'infiltration.

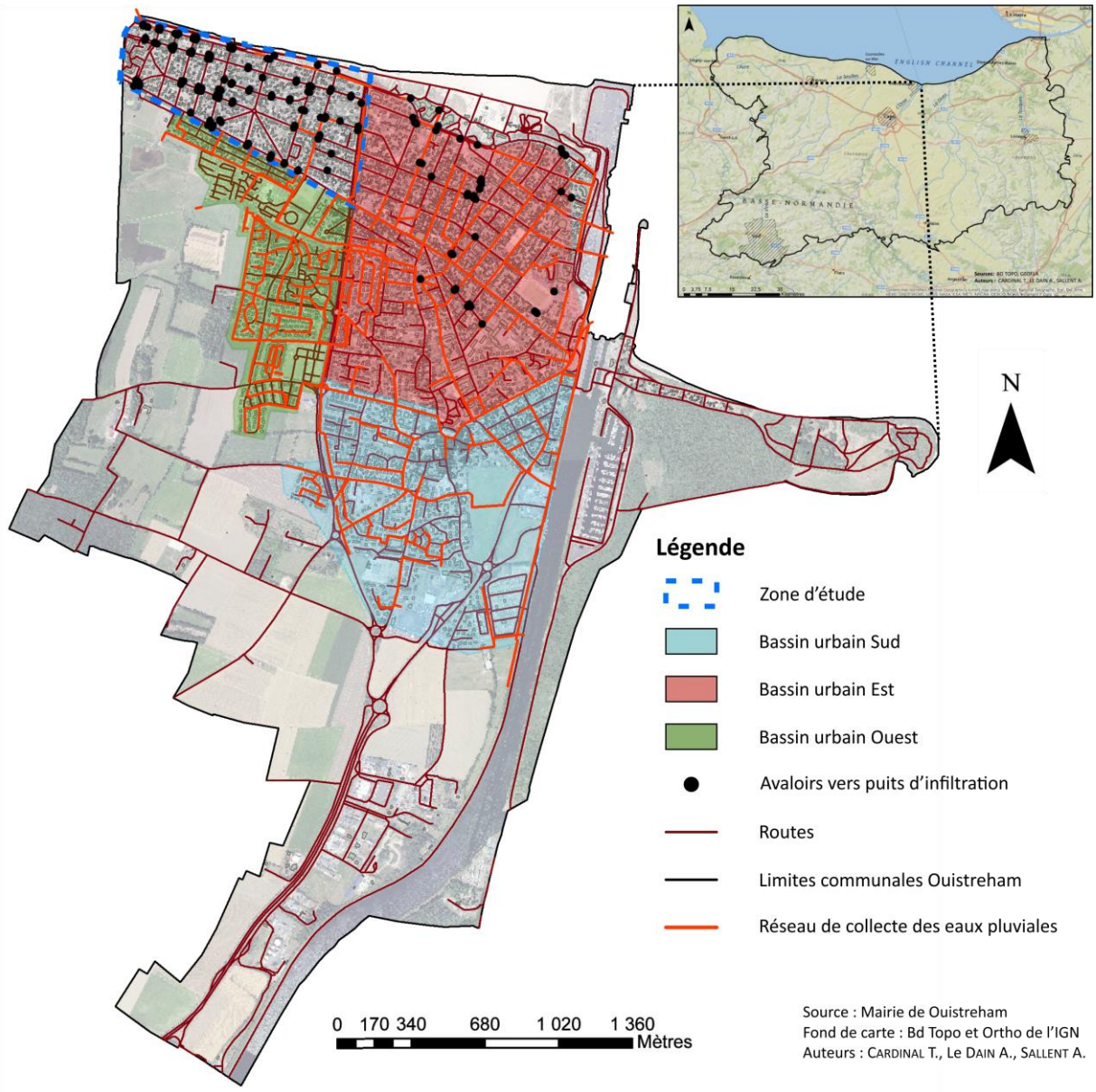


Figure 2.27 - Carte de situation de la commune de Ouistreham, de la zone d'étude et représentation schématique du réseau de collecte des eaux pluviales de la commune de Ouistreham

2.3.1.4 UN SITE AVEC DE MULTIPLES ENJEUX DE GESTION DES EAUX

a. Enjeu des aléas d'inondation

Cette localisation spécifique de la commune de Ouistreham la rend particulièrement vulnérable à différent types d'aléas d'inondation : submersion marine due à sa façade littorale, débordement de cours d'eau avec la présence de l'Orne et du canal, remontée de nappe due à la présence d'une nappe affleurante et inondation soudaine due à la saturation de son réseau d'eau pluviale ou aux ruissellements de surface.

- **Le risque de submersion marine.** Ce risque concerne particulièrement l'ancien tracé de l'Orne et la partie de la ville qui longe le canal. En effet, cette partie de la commune, située derrière

la dune, se trouve pour partie à une altitude inférieure au niveau des plus hautes marées[10]. Le cas d'un scénario extrême prévoit une submersion très importante de toute la partie Nord du bourg et le long de l'Orne. Un tel scénario extrême impacterait donc la zone d'étude située en bord de mer.

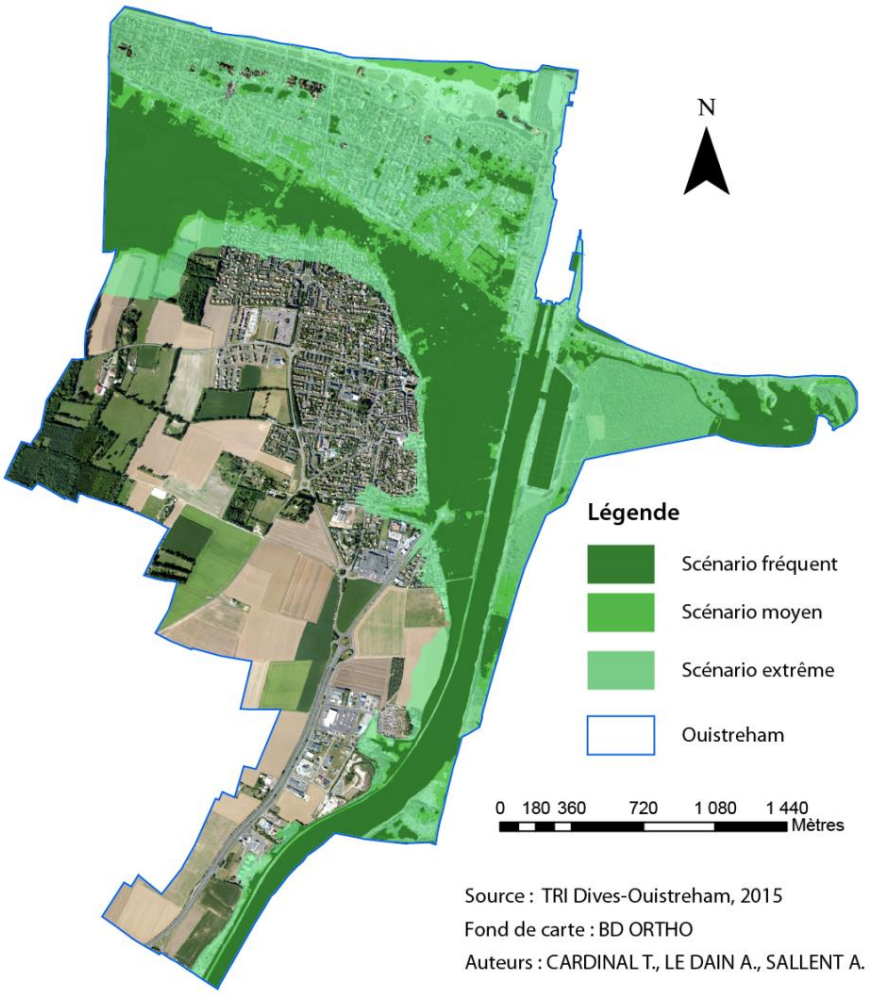


Figure 2.28 - Carte d'estimation du risque d'inondation par submersion marine sur la commune de Ouistreham à partir de l'altitude du niveau marin (DREAL Normandie, 2014)

- **Le risque de débordement de cours d'eau.** Ce risque ne concerne que les abords immédiats de l'Orme et du canal et n'impacte pas la zone d'étude. Une inondation des parties basses de Ouistreham par rupture du canal de Caen-la-Mer s'est produite en 1995 (avec jusqu'à 1.5 m d'eau au point le plus bas). Depuis l'exutoire du canal a été protégé et surtout le déversoir du Maresquier a été inauguré en 2003 et permet de déverser les eaux du canal vers l'Orne.
- **Le risque d'inondation par remontée de nappe.** Il concerne logiquement les zones où la nappe est la plus proche de la surface, voire affleurante, qui correspondent aux zones les plus basses de la commune. La zone d'étude est peu concernée par cet aléa d'une part en raison de la profondeur de la nappe (entre 1 et 5 mètres) (Figure 2.29) et d'autre part, en raison du caractère particulièrement drainant de la dune qui permet une évacuation rapide de l'eau de nappe vers la mer. Cependant ce risque n'est pas à écarter pour les points bas de la zone en

[10] Le marnage est de 7,6 mètres à Ouistreham et l'écart entre le zéro hydrographique (hauteur de l'eau en basse mer) et le zéro IGN est de 4.08 mètres. Autrement dit, une zone (hypothétique) située à l'altitude IGN de 0 mètre peut se retrouver à 3,52 mètres sous le niveau de la mer lors des plus hautes marées.

cas de concomitance entre un très fort coefficient de marée et un niveau de nappe particulièrement haut. Ce risque sera de plus en plus sensible dans les années à venir en raison de l'élévation du niveau de la mer, estimée pour les côtes Normandes à 60 cm à horizon 2100 (Service des Risques Naturels et Hydrauliques, 2014).

Figure 2.29 - Profondeur de la nappe à l'échelle du quartier *Riva Bella* lors de l'hiver 2001 (DREAL Normandie, 2014)

- **Le risque d'inondation par ruissellement ou débordement du réseau de collecte des eaux pluviales.** Ce risque est le moins documenté, aucune étude n'a été conduite sur cet aléa. La caractérisation de ce risque s'appuie sur l'expérience des interlocuteurs de la ville, notamment sur les informations communiquées par la mairie de Ouistreham. C'est notamment contre ce risque que les revêtements perméables peuvent être bénéfiques. Cet enjeu de gestion des eaux pluviales est détaillé ci-dessous.

b. Enjeu de la gestion des eaux pluviales

La commune de Ouistreham est en grande majorité couverte par un réseau de collecte des eaux pluviales, à l'exception d'une zone, la partie ouest du quartier *Riva Bella,* qui n'est desservie par aucun réseau d'eaux pluviales (Figure 2.27). À noter que la ville a principalement une connaissance empirique de son réseau. Elle ne connait pas l'emplacement exact ni le diamètre de l'ensemble des collecteurs ni le détail de leurs pentes et leur raccordement.

Le quartier *Riva Bella*, périmètre de cette étude, a la spécificité de ne pas être couvert par le réseau d'assainissement pluvial, à l'exception de quelques avaloirs au Nord-Est qui sont drainés vers le bassin de rétention. L'évacuation des eaux pluviales sur cette zone a longtemps été assurée par infiltration directe dans la dune. L'imperméabilisation des routes puis d'une partie des trottoirs ces dernières années a conduit la ville de Ouistreham à réaliser de nombreux puits d'infiltration là où des inondations commençaient à revenir régulièrement (Figure 2.30). Ce phénomène a été particulièrement marqué pour le boulevard Aristide Briand en front de mer. En effet, l'imperméabilisation des trottoirs à l'occasion des célébrations des 70 ans du débarquement en 2014 a entrainé l'inondation du boulevard lors des évènements pluvieux importants qui ont suivi (2.3.2.3).

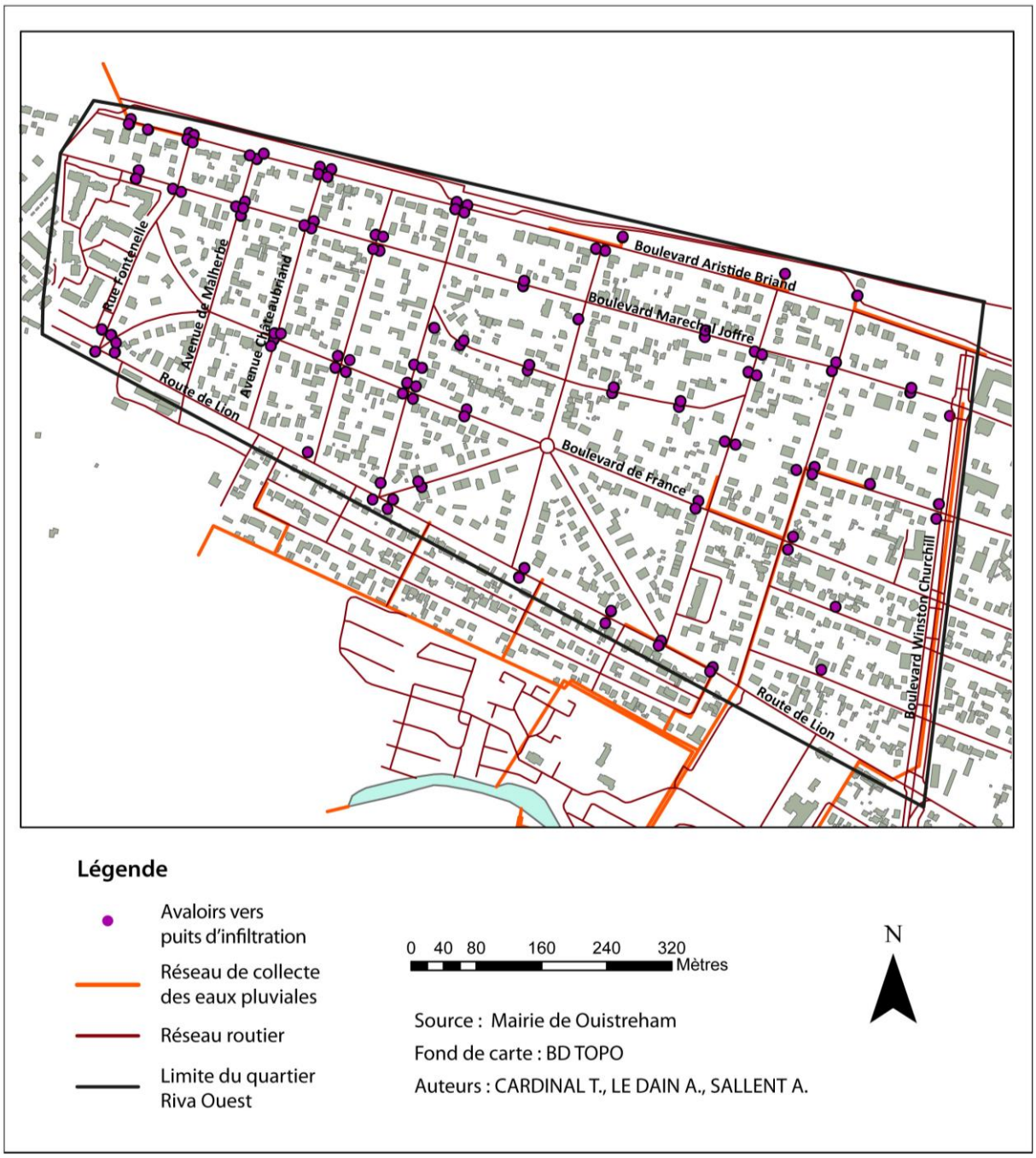


Figure 2.30 - Carte de localisation des puits d'infiltration sur le quartier *Riva Bella*

La construction des puits d'infiltration s'est faite au cas par cas, de façon empirique suite aux inondations constatées, sans étude globale du ruissellement sur la zone et parfois sans garder une trace de leur réalisation. Ainsi, sur le schéma d'assainissement pluvial communiqué par la ville certains puits d'infiltration étaient manquants. Pour la construction de la localisation des puits d'infiltrations utilisés dans le modèle les données du schéma d'assainissement ont été vérifiées et complétées par un repérage sur le terrain. Ces puits d'infiltrations sont présentés sur la Figure 2.30.

Compte tenu de ce contexte d'imperméabilisation, des inondations soudaines dues au ruissellement de surface sont régulièrement observées sur le quartier *Riva Bella.* En effet suite à l'imperméabilisation du sol, certaines zones n'ont plus d'exutoire naturel. Cumulé avec la

topographie de la dune qui présente de nombreuses pentes et cuvettes ce contexte spécifique entraîne une montée rapide des niveaux d'eau dans les parties basses du quartier Riva-Bella lors de forts épisodes pluvieux. La mairie de Ouistreham a notamment documenté deux évènements qui ont impacté le site d'étude, inondant certains carrefours et des garages de riverains situés en contrebas de la rue. Ces évènements seront détaillés à la section 2.3.2.3.

Ces phénomènes d'inondations sont aggravés par le colmatage rapide des puits d'infiltration par le sable éolien transporté par le vent depuis la plage et la dune. Les puits doivent faire l'objet d'entretien régulier ce qui limite leur efficacité et leur pertinence. Ce sable représente donc également un risque de colmatage pour les revêtements perméables, notamment en cas d'installation en front de mer.

Concernant le reste de la commune, le réseau de collecte des eaux pluviales de Ouistreham peut être schématisé en trois parties distinctes représentées sur la Figure 2.27. La première partie (basin urbain Sud), qui comprend la partie sud du bourg, voit ses eaux pluviales collectées dirigées vers un fossé le long de l'avenue du Grand Large, avant de rejoindre le fossé de ligne. Ce fossé de ligne longe le canal, et se rejette dans l'avant-port, au niveau de l'exutoire du réseau principal. La deuxième partie (bassin urbain Est), comprend le centre bourg jusqu'à la mer, et s'étend à l'Ouest jusqu'au Boulevard Churchill. C'est la partie principale du réseau, elle draine 1,2 km^2. Les eaux pluviales, dans cette partie de Ouistreham, sont collectées par deux conduites principales et acheminées jusqu'à l'avant-port où elles sont rejetées dans la mer. La troisième partie du réseau (basin urbain Ouest), concerne le sud-ouest de Ouistreham, quartier de la Reine Mathilde, Les Charmettes et l'avenue Lamartine. Cette partie du réseau se déverse dans un bassin de rétention situé au bas du quartier de la Reine Mathilde avant de rejoindre le marais de Colleville.

Ce réseau présente un certain nombre de difficultés dont deux peuvent être mises en avant.

- **Son exutoire principal, la fosse du port**. Les zones Sud et Est de la ville sont drainées vers le même exutoire, une fosse au niveau de la halle aux poissons qui se déverse dans l'avant-port. Or, l'évacuation naturelle de la fosse est située sous le niveau de la mer à marée haute en cas de fort coefficient. Un clapet de non-retour empêche l'eau de mer de pénétrer dans la fosse et l'évacuation de cette dernière est alors dépendante d'une pompe qui relève éventuellement les eaux et les déverse dans l'avant-port.
- **La saturation des réseaux.** Les notes fournies par la mairie de Ouistreham font part de plusieurs évènements qui ont entraînés l'inondation du quartier Riva Est et du bas du bourg de Ouistreham, tous deux drainés par le réseau qui se jette dans la fosse de l'avant-port. Selon ses observations (inondations en période de basse mer) ces inondations sont dues à une saturation du réseau en amont de la fosse du port. Cette saturation des réseaux est renforcée par la topographie de la zone, les quartiers en question étant situés en contrebas du port et donc proche du niveau de l'exutoire.

L'ensemble de ces enjeux de gestion des eaux pluviales motive particulièrement l'intérêt de la ville pour des solutions alternatives et a largement contribué à favoriser la coopération avec la mairie de Ouistreham dans le cadre de cette thèse.

2.3.2 DONNÉES UTILISÉES DANS LE MODÈLE *POROUSCITY*

La construction du modèle PorousCity nécessite des données qui sont détaillées dans cette section :

- des données topographiques pour la simulation des écoulements (2.3.2.1) ;
- des données d'occupation du sol en termes de type de revêtement pour pouvoir faire correspondre à chaque type de surface des propriétés hydrologiques (2.3.2.2) ;
- des données sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant, incluant la localisation des éventuels ouvrages (puits d'infiltration dans le cas présent) et des données de réponses hydrologiques observées sur le terrain pour confronter les résultats du modèle aux processus réels (2.3.2.3).

Ces données ont été collectées en premier lieu en utilisant les informations cartographiques publiques disponibles et dans un second temps des observations de terrain pour préciser, compléter ou corriger les données retenues. Le Tableau 2.10 présente l'ensemble des données collectées et leurs propriétés.

Tableau 2.10 – Synthèse et description des données utilisées pour représenter le bassin versant étudié, le quartier *Riva Bella,* dans le modèle *PorousCity.*

Données	Source	Zone couverte	Description
Topographique	MNT RGE ALTI 1 mètre (MNT LIDAR réalisé dans le cadre du projet litto3D®)	Tout le quartier *Riva Bella*	Précision horizontale : 1 mètre Précision verticale : 20 cm
	Levés topographiques sur le terrain par DGPS	L'avenue de Verdun et le carrefour de l'Av. de Malherbe et du Bd. Aristide Briand	Précision horizontale : < 30 cm Précision verticale : < 10 cm
Occupation du sol	Photographies aériennes de la BD Ortho	Tout le quartier *Riva Bella*	Découpage manuel de l'occupation du sol par type d'usage
	Observation de terrain	L'avenue de Verdun	Cartographie par type de revêtement de sol.
Géologie	BRGM	Tout le quartier *Riva Bella*	Carte et sondages géologiques
Hygrologie	TRI de Caen-Dives (DREAL Normandie)	Tout le quartier *Riva Bella*	Cartes des hauteurs de plus hautes eaux de nappe.
	Sondage de projet immobilier	Localisation ponctuelle (Piscine municipale)	Hauteur de nappe dans la dune
Fonctionnement hydrologique	Schéma d'assainissement de la ville	Tout le quartier *Riva Bella*	Localisation des puits d'infiltration non complète sur le site d'étude.
	Observations de terrain		Vérification des informations du schéma d'assainissement.
	Compte-rendu d'évènements de la mairie de Ouistreham		Compte-rendu réalisés suite aux inondations constatées sur le quartier. Information sur la localisation et la hauteur de ruissellement constatées.
	Observations des riverains		Témoignages d'habitants sur les inondations constatées.
	Observations des agents de la ville		Informations sur la fréquence d'entretien des puits d'infiltration et la localisation des puits qui

débordent régulièrement.

2.3.2.1 DESCRIPTION DES DONNÉES TOPOGRAPHIQUES

Le modèle numérique de terrain (MNT) réalisé pour représenter, dans le modèle *PorousCity*, la topographie de la zone est issu de la donnée topographique « RGE ALTI 1 mètre » correspondant à une topographie réalisée à partir du relevé LIDAR conduit dans le cadre du projet Litto3D® (IGN, 2015). L'échelle et la précision de ce jeu de données constitue un enjeu clef pour la qualité future du modèle. Pour étudier la fiabilité de cette donnée, des relevés de terrain ont été conduits sur une partie du bassin versant d'étude. Ces relevés permettent également de rendre compte de l'impact de la finesse de la donnée sur les résultats de modélisation. La topographie de la zone d'étude est ensuite présentée et commentée.

a. Levés de terrain

Ces levés permettent de compléter les données existantes, de détailler certaines zones spécifiques et de vérifier les données LIDAR utilisées. Sur la base de l'expérience de la ville sur les zones régulièrement inondées, les levés topographiques ont été conduits sur l'Avenue de Verdun et le carrefour de l'Avenue de Malherbe. Ces relevés de terrains ont été réalisés dans le cadre d'un travail de deuxième année de master (Cardinal et al., 2017) par un nivellement à la lunette optique et au DGPS.

La base DGPS a été installée au bout de l'Avenue de Verdun, sur la dune (Figure 2.31). Un clou de géomètre a été planté à côté de la base DGPS pour faire des calculs concernant les erreurs d'enregistrement. Plusieurs mesures ont été répétées afin de définir les différences de positionnement entre chaque mesure et en extraire une marge d'erreur. Les mesures ont principalement été réalisées sur l'Avenue de Verdun en prenant en considération toutes les modifications présentes sur l'Avenue (cuvettes, délimitations de trottoirs, avaloirs, etc.). Des mesures ont également été réalisées sur les parkings, la route et les trottoirs du boulevard du front de mer (Boulevard Aristide Briand) et sur le Boulevard Maréchal Joffre, parallèle au Boulevard Aristide Briand, qui correspondent à des zones fréquemment inondées. Ces relevés sont localisés sur la Figure 2.32.

(a) (b)

Figure 2.31 – Photos des conditions du levé de terrain. (a) Base DGPS placée sur la dune et (b) récepteur mobile placé sur un parking le long du boulevard Aristide Briand (Cardinal et al., 2017)

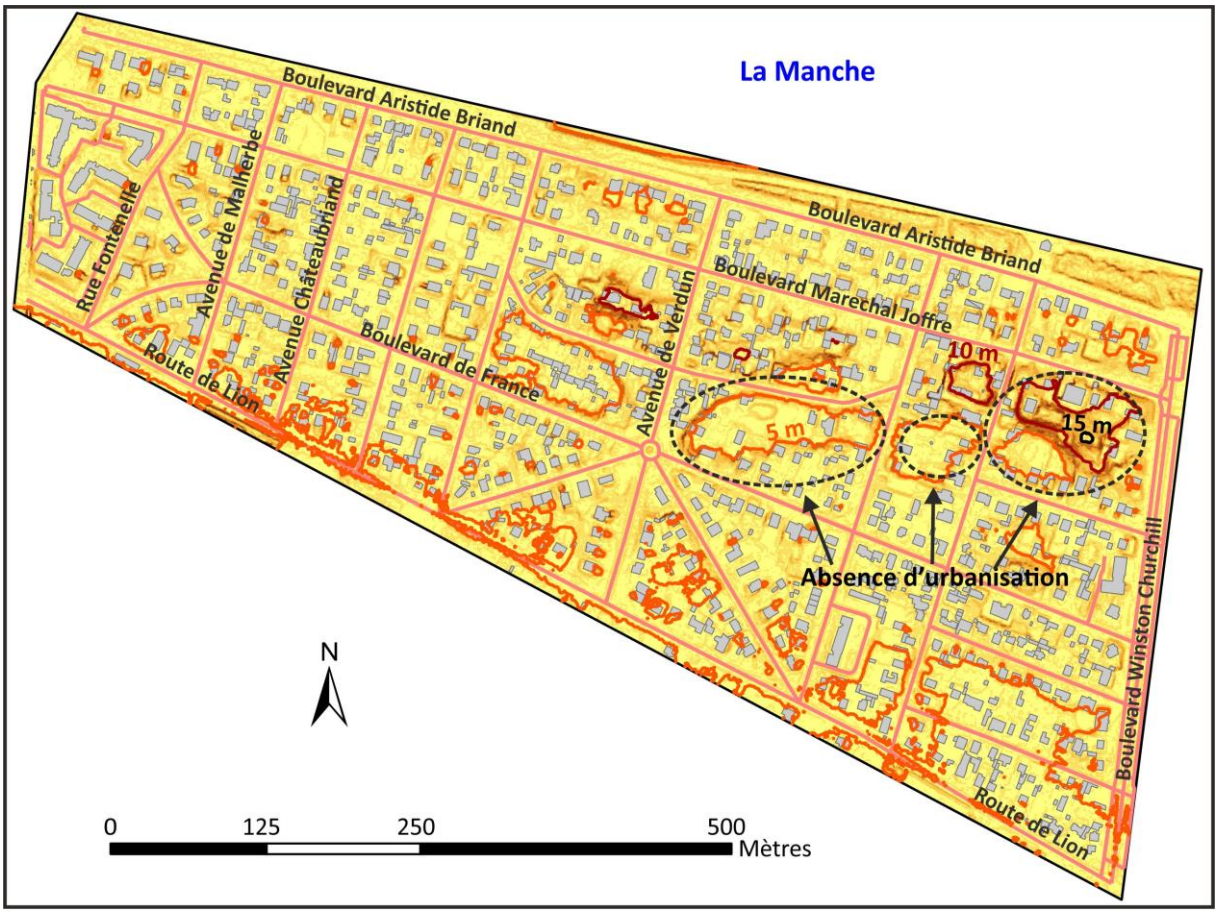
Figure 2.32 – Cartographie de l'ensemble des levés de point sur le quartier *Riva Bella*

b. Description de la topographie de la zone d'étude

L'étude des pentes et des écoulements potentiels sur la zone a ainsi été réalisée sous ArcGIS à partir des données du MNT.

La carte des pentes (Figure 2.33) a été réalisée à partir du MNT « RGE ALTI 1 mètre ». Le quartier Riva Bella se situant sur un ancien massif dunaire, présente une topographie accidentée, représentée par le MNT. La description globale de la zone permet de mettre en évidence que le Boulevard de France constitue une ligne haute de la dune. Les écoulements de pentes moyennes sont orientés perpendiculairement à cet axe, d'un côté du Boulevard de France vers le Boulevard Aristide Briand, de l'autre du Boulevard de France vers la Route de Lion. Le centre de la dune a une topographie particulièrement marquée et certaines zones de l'est de la zone présentent de fortes pentes.

L'observation de la Figure 2.33 permet également de mettre en évidence les points bas de la zone d'étude : quatre zones de cuvette, isolignes d'altitude 5 mètres, situées au centre de la dune et une large zone le long de la route de Lion. Inversement, trois points hauts peuvent être identifiés, isolignes 10 mètres et 15 mètres, également au centre de la dune. Ces zones correspondent généralement à des espaces non urbanisés, et se situent majoritairement en cœur d'îlot (à l'exception de la route de Lion). La zone basse qui longe la route de Lion en pénétrant parfois dans les parcelles voisines constitue quant-à-elle un espace connecté au domaine public qui draine une partie du ruissellement en provenance du Boulevard de France. Cette partie du bassin versant sera à considérer avec attention dans la modélisation.



Légende

Pentes en pourcentage

- 0 - 5 %
- 5 - 13 %
- 13 - 23 %
- 23 - 37 %
- 37 - 56 %
- 56 - 95 %
- 95 - 227 %

Isolignes d'altitude en mètres

- 5 m
- 10 m
- 15 m

- Délimitation Quartier Riva Ouest
- Routes
- Bâtiments

Auteurs : CARDINAL Thibaut, LE DAIN Anaïs, SALLENT Augustin

Source : *Litho 3D du ROLNP*

Figure 2.33 - Carte des pentes à l'échelle du quartier *Riva Bella*

Outre l'étude de la topographie générale du quartier, la carte des pentes permet également d'étudier les écoulements de surface. La Figure 2.34 représente le sens des écoulements se produisant sur les routes. La carte 'A' a été réalisée à partir des données de la « BD TOPO de l'IGN » et du « RGE ALTI 1 mètre » et la carte 'B' a été construite uniquement avec les données topographiques collectées sur le terrain. Sur la carte A, seule la pente générale de chaque route est renseignée. Des zones de concentration s'observent au niveau de certains carrefours : carrefour entre le Boulevard Aristide Briand et l'Avenue de Verdun ; carrefour entre le Boulevard Aristide Briand et l'Avenue de Malherbe. Les données topographiques collectées sur le terrain (Figure 2.34 B) permettent d'identifier plus finement les zones de concentration du ruissellement.

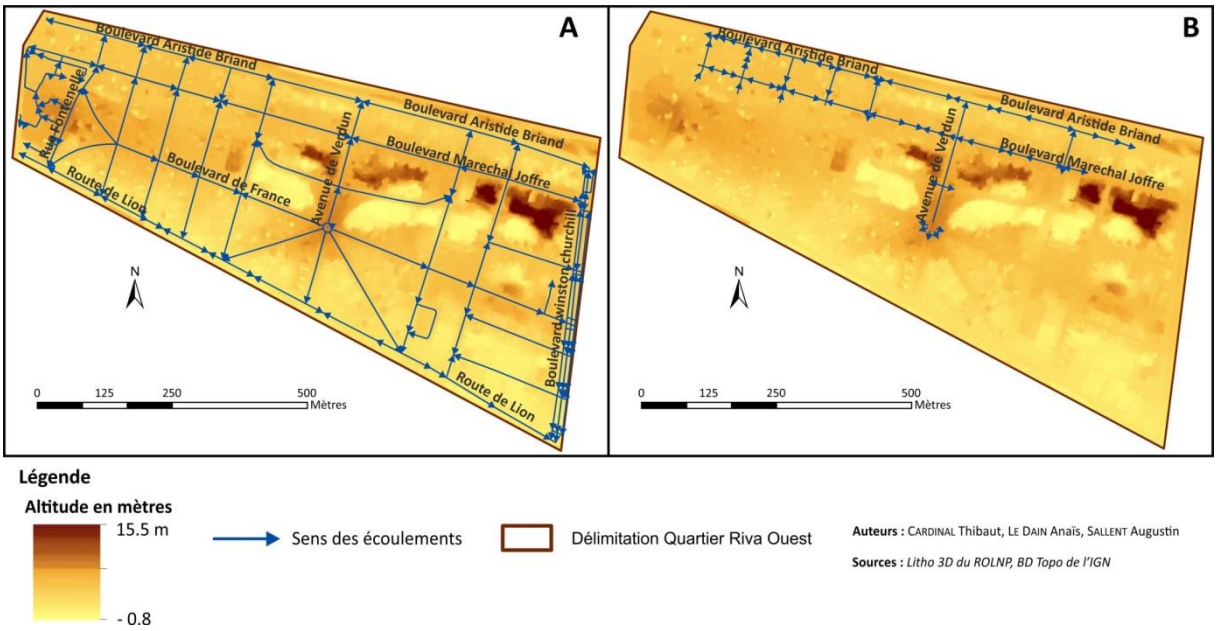


Figure 2.34 - Carte des écoulements par rue (A) basée sur les informations topographiques de la « BD TOPO de l'IGN », du « RGE ALTI 1 mètre ». (B) basé sur le MNT produit à partir du levé de terrain

Par exemple, pour le Boulevard Marechal Joffre, l'examen de la micro topographie permet de percevoir une série de sommets et de cuvettes (Figure 2.35). Il est intéressant d'observer que les puits d'infiltration sont localisés précisément dans ces cuvettes (« points bas » hydrologiques), témoignant de leur juste implantation issue d'une connaissance empirique des inondations locales (ou vu autrement, témoignant de la justesse du MNT réalisé).

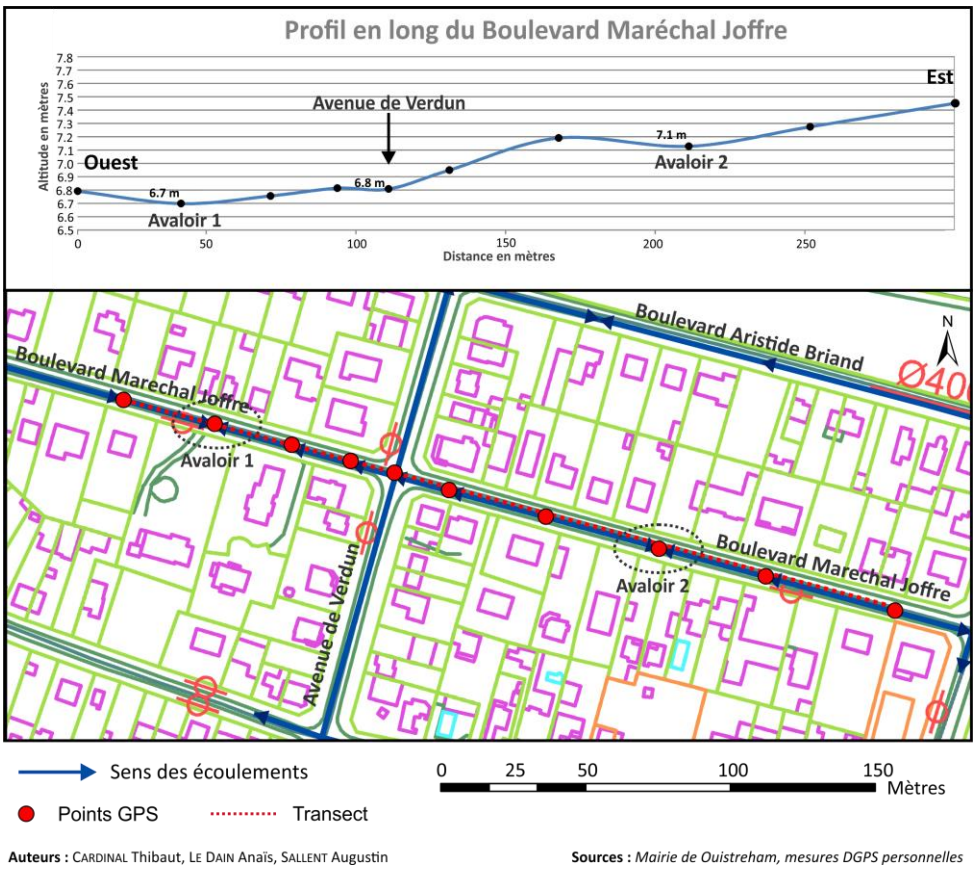
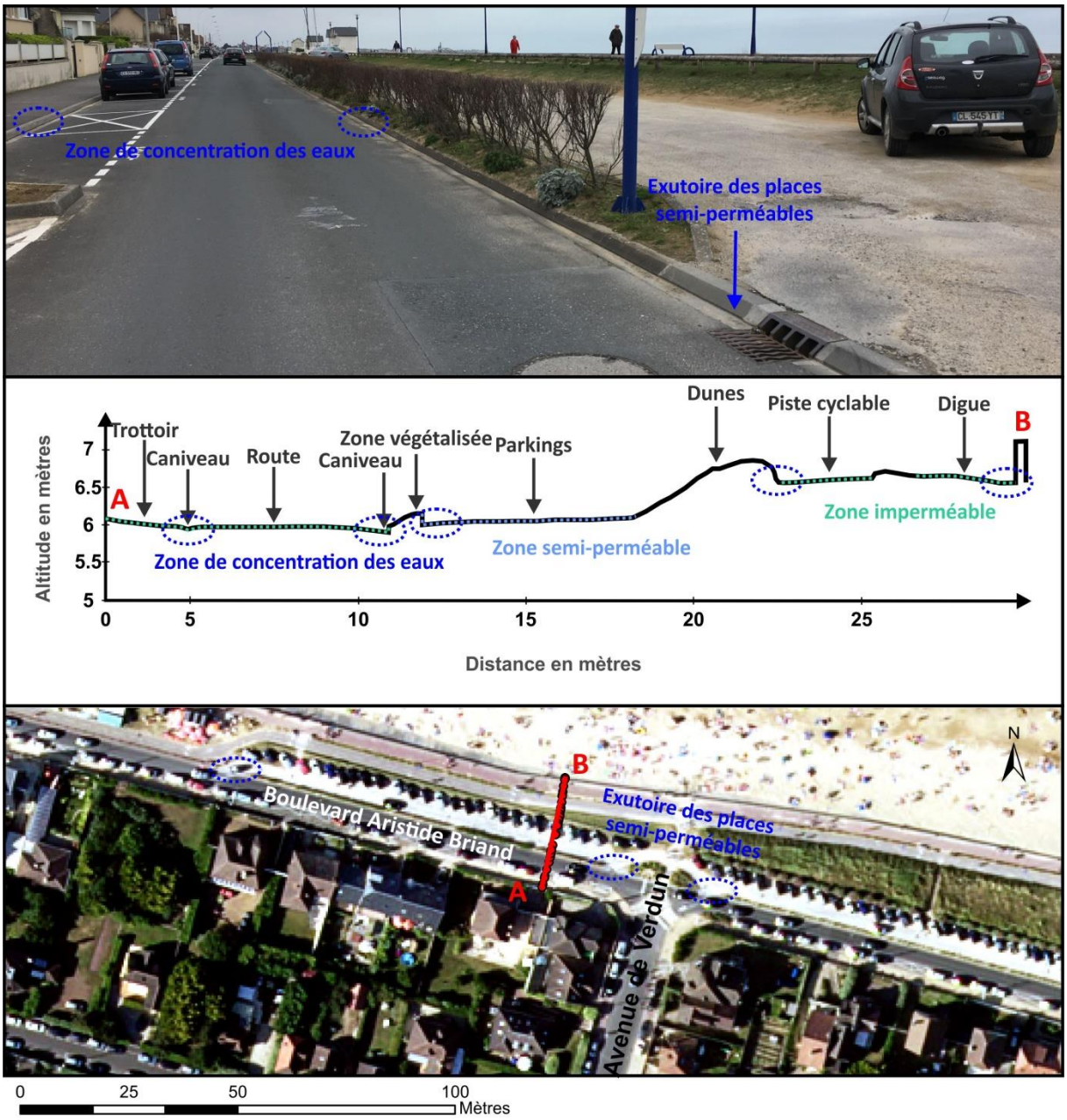


Figure 2.35 – Carte de localisation et profil en long du Boulevard Maréchal Joffre selon le levé de points GPS

L'exploration du MNT et du levé de terrain permet également d'étudier certains détails locaux comme la zone drainée par un carrefour. L'exemple du carrefour de l'Avenue de Verdun et le Boulevard Aristide Briand est présenté sur la Figure 2.36. Ce carrefour draine une partie des deux avenues et les parkings aménagés en front de mer. La même configuration va s'opérer au niveau des autres parkings bordant le Boulevard Aristide Briand. Au total, ce sont 3 855 m^2 de parkings qui sont ainsi drainés vers les différents carrefours. Une telle observation permet d'anticiper des potentielles concentrations importantes du ruissellement au niveau des carrefours du front de mer. Concentrations effectivement observées sur le terrain lors des évènements pluvieux engendrant un ruissellement notable. Ces observations serviront de données pour la vérification des résultats obtenus avec le modèle *PorousCity.*



Auteurs : CARDINAL Thibaut, LE DAIN Anaïs, SALLENT Augustin **Sources :** *BD Ortho de l'IGN, Photographie personnelle*

Figure 2.36 – Photo, coupe et carte de localisation montrant les zones de concentration des eaux pluviales au niveau du carrefour entre l'Avenue de Verdun, le Boulevard Aristide Briand

2.3.2.2 L'OCCUPATION DU SOL DU QUARTIER *RIVA BELLA*

La modélisation spatialisée des processus hydrologiques nécessite la prise en compte de l'occupation du sol. La description de cette occupation du sol a été réalisée spécifiquement pour ce travail. Une base de données a été créée sous ArciGIS en se basant sur les photographies aériennes de la BD Ortho, complétée par des observations sur le terrain. En effet, à l'échelle du quartier, il est difficile d'identifier les détails à la résolution du mètre carré à partir des photographies aériennes, or comme cela sera développé dans cette section l'hétérogénéité de certains revêtements peut justifier une description plus fine qui nécessite des observations sur le terrain. Cette sous-section présente l'occupation du sol sur l'ensemble du quartier avant de détailler certaines zones spécifiques.

a. Description générale de l'occupation du sol

Le quartier de *Riva Bella* présente une morphologie urbaine typique d'une urbanisation pavillonnaire (Figure 2.37). Cette partie de Ouistreham est très largement composée de parcelles privées comportant une maison et un jardin. Quelques résidences collectives sont également présentes aux extrémités est et ouest, elles sont entourées de places de stationnements et d'espace verts privés. Le domaine public est principalement composé des voies de circulation, routes bordées de part et d'autre de trottoirs. Le reste du domaine public correspond à la dune du front de mer, la zone qui sépare la plage du Boulevard Aristide Briand (boulevard du front de mer). Cet espace comprend une promenade piétonne, une piste cyclable et un ensemble de parkings. La promenade et la piste cyclable sont bitumées ou bétonnées, donc imperméables, les places de stationnement sur la dune sont en terre et gravier compacté, avec une faible perméabilité.

Figure 2.37 - Carte d'occupation du sol en termes d'usage à l'échelle du quartier *Riva Bella*

La Figure 2.38 complète la carte précédente. Ce graphique fait apparaitre clairement l'importance des parcelles privées (jardins 55 % et bâti 14.1 %) ainsi que des routes (10.7 %) et

trottoirs (10.3 %). Les autres types d'occupation du sol cumulés représentent moins de 10% de la zone.

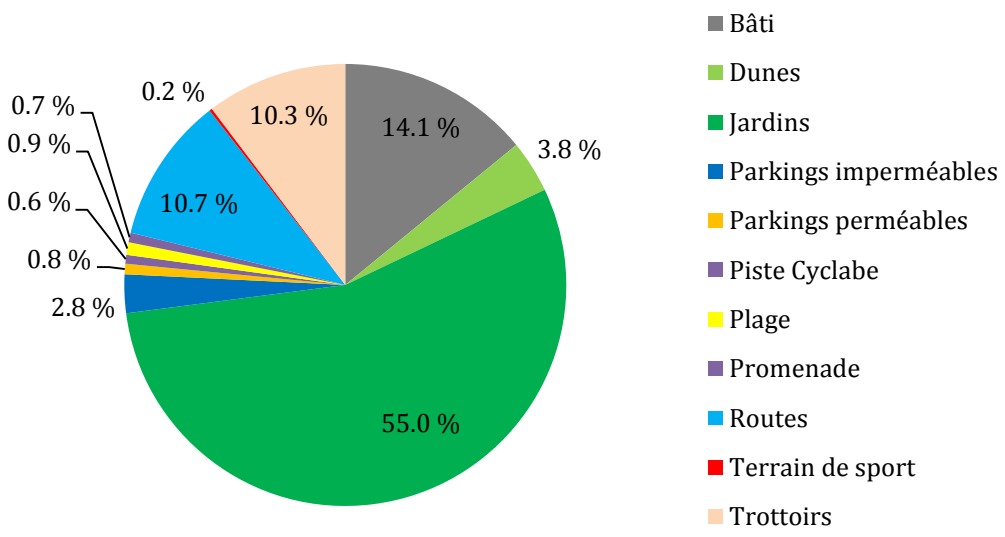


Figure 2.38 - Graphique de la répartition des usages d'occupation du sol à l'échelle du quartier *Riva Bella*

La Figure 2.39 présente un aperçu visuel des différents revêtements présents sur le quartier *Riva Bella*.

Figure 2.39 – Illustration des typologies de l'occupation du sol à l'échelle du quartier *Riva Bella*

Dans le cadre de ce travail, il est intéressant d'étudier l'occupation du sol non seulement en considérant son usage (voir ci-dessus) mais également en s'intéressant au type de revêtement. Les différents revêtements présents sur la zone peuvent être décomposés du point de vue hydrologique entre des surfaces perméables, ou imperméables.

Les surfaces perméables couvrent des réalités très diverses, avec des perméabilités tout aussi hétérogènes, du sable très perméable au sol compacté peu perméable. Ces espaces sont

largement majoritaire sur le quartier, ils représentent 71 % de l'occupation du sol (dont 55 % pour les seuls jardins).

Les zones imperméables représentent 29 % de la zone d'étude. Ces espaces sont particulièrement intéressants pour ce travail en raison de leur importance sur la génération du ruissellement et de leur potentiel de transformation en surface perméable via l'implantation de structures à revêtements perméables.

Le Tableau 2.11 détaille les différentes catégories d'occupation du sol et donne pour chaque type d'usage du sol la correspondance retenue en terme de type de surface.

Tableau 2.11 – Description des différentes typologies d'occupation du sol du quartier *Riva Bella* et du revêtement de surface associé.

Type d'occupation du sol	Description	Type de revêtement de surface modélisé
Dunes	Largement occupé par des massifs de végétation arbustive et d'oyat	Revêtement enherbée
Plage	Partie la plus basse de la zone d'étude	Revêtement sableux
Rond-point	Situé au nord de l'avenue de Verdun, il constitue le point haut de la zone d'étude.	Revêtement enherbé
Parkings du front de mer	Un peu surélevés par rapport au Boulevard Aristide Briand et avec une pente vers ce même boulevard ils constituent une zone génératrice de ruissellement. Leur surface est composée de sable et gravillons compactés.	Revêtement compacté
Trottoirs	Revêtement très hétérogène : sable, herbe, graviers compactés, bitume. Dans une première approximation ils seront considérés de façon homogène et traités comme un revêtement peu perméable.	Revêtement compacté
Jardin	Ces espaces peuvent aussi bien être perméables (gazon, jardinière) ou peu perméable voir imperméables (entrée de garage, terrasse)	Espace privé – non modélisé
Promenade littorale et piste cyclable	Voies bitumées qui longent la plage avec quelques points d'accès vers la ville.	Revêtement bitumé
Routes	Composent la majorité de la surface imperméable.	Revêtement bitumé
Parkings imperméables	Places de stationnement aménagées sur la voirie, notamment sur le Boulevard Marechal Joffre, et stationnements privés au niveau des quelques des résidences du quartier.	Revêtement bitumé
Terrains de sports	Deux terrains de tennis goudronnés	Revêtement bitumé
Bâti	Le bâti est imperméable (toiture en tuiles) mais l'évacuation des eaux pluviale en sortie de gouttière doit être gérée au niveau de la parcelle d'après la réglementation en vigueur	Espace privé – non modélisé

La description précédente permet de représenter l'occupation du sol de la zone d'étude en des types de revêtement attribués à chaque espace. Cette attribution d'un type de revêtement se fait dans le modèle *PorousCity*, la carte (Figure 2.40) est ainsi exportée depuis le modèle.

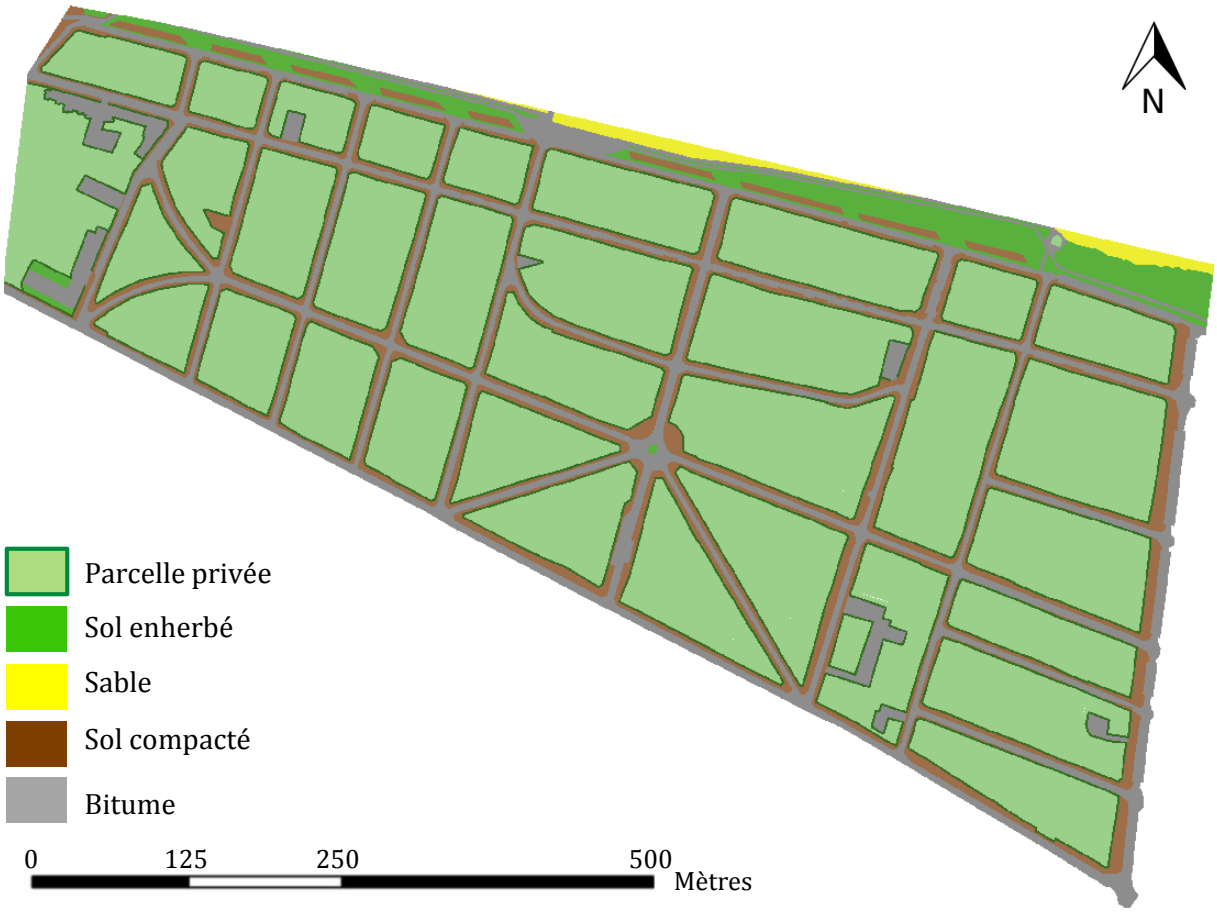


Figure 2.40 - Carte d'occupation du sol en fonction du type de revêtement à l'échelle du quartier *Riva Bella*, exportation depuis Netlogo.

Les pourcentages respectifs de chaque type de revêtement de sol présent sur la carte précédente sont les suivants : espaces privés 69 %, bitume 15 %, sol compacté 11 %, sol enherbé 4 % et sable 1 %. Les espaces privés sont largement majoritaires, inversement aux espaces publics très perméables (herbe et sable) qui ne représentent que 5 % de la zone. Cette présentation générale de l'occupation du site d'étude va maintenant être détaillée à la fois concernant le type d'usage et le type de revêtement avec un point sur les trottoirs et un sur la question du stationnement.

b. Le cas spécifique des trottoirs

Les trottoirs constituent à double titre un espace clef en vue de la modélisation des processus hydrologique sur le quartier. Premièrement en raison de l'hétérogénéité de leurs revêtements de surface qui complique la modélisation hydrologique, deuxièmement en raison de l'impact important de leur imperméabilisation sur le ruissellement de surface et les inondations.

Étant données la surface couverte par les trottoirs (10,3 % de la zone) et leur influence sur la génération du ruissellement, l'hypothèse d'un revêtement homogène prise précédemment peut être une source d'erreur importante pour le travail de modélisation. Pour approfondir cette question et permettre de quantifier l'impact de l'homogénéisation des revêtements des trottoirs sur les résultats du modèle, une description fine de leur surface a été réalisée sur l'avenue de Verdun. Une nouvelle carte d'occupation du sol a ainsi été produite, Figure 2.41.

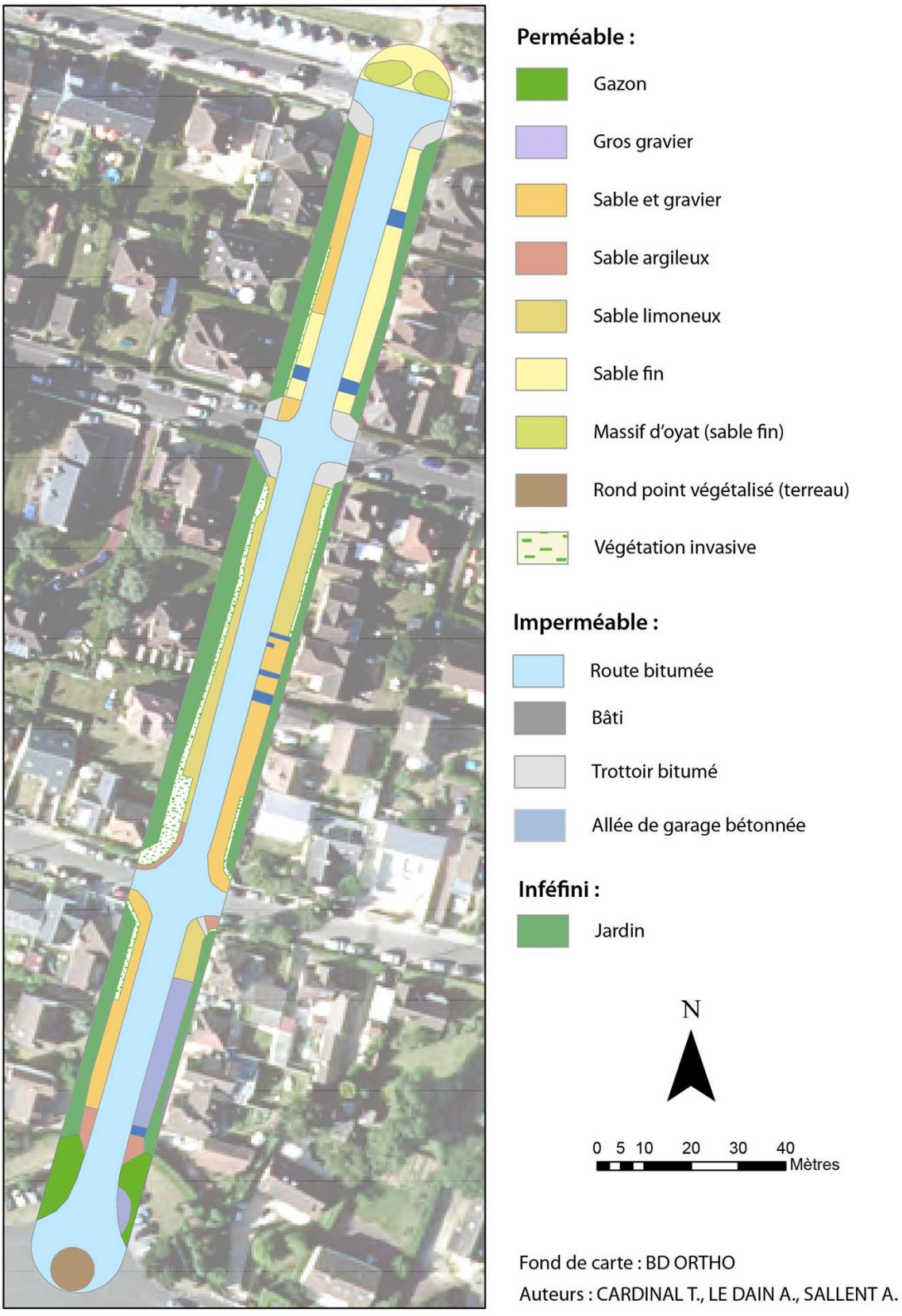


Figure 2.41 - Carte détaillée des types de revêtements de sol sur l'Avenue de Verdun

Cette carte illustre la grande diversité des types de revêtements. Pour caractériser cette hétérogénéité une observation des revêtements de trottoir a été réalisée sur le terrain. Ils présentent des revêtements divers, variant entre du sable, des graviers, de l'herbe, ou encore du

bitume en cas d'aménagement par les riverains de l'entrée de certains garages. Ces différents types de revêtement peuvent se mélanger par endroit, entraînant de nombreuses variations de texture. Ainsi un revêtement en sable peut être plus ou moins argileux et limoneux, plus ou moins végétalisé, voire mélangé avec du gravier (Figure 2.42). Cette diversité qui induit des comportements hydrologiques très contrastés entre des revêtements artificiels (béton, bitume, graviers) qui vont être peu voire pas perméables et générer rapidement un ruissellement important et des revêtements plus naturels (sable, herbe) dont la perméabilité importante permettra de limiter et ralentir la génération du ruissellement. Des simulations seront spécifiquement dédiées à la quantification des différences entre les deux degrés de finesse de représentation des revêtements de trottoirs sur l'avenue de Verdun.

Figure 2.42 - Photographies de deux faciès de trottoirs sur l'Avenue de Verdun

L'hétérogénéité des revêtements de trottoirs peut également être perçue comme gênante pour la circulation des piétons ou pour l'esthétique urbaine. Aussi, les trottoirs du front de mer avaient été bitumés pour le passage des Présidents et représentants officiels de différents pays à l'occasion de l'anniversaire des 70 ans du débarquement des alliés. L'aménagement des trottoirs se heurte donc à différents enjeux d'usages (circulation des piétons, accès des véhicules aux garages privés), d'esthétique urbaine (homogénéisation de la surface), et de gestion des eaux pluviales. Ils sont également au cœur de la question de l'aménagement du stationnement sur le quartier, détaillée au point suivant. Tous ces enjeux font des trottoirs un espace privilégié pour cette étude.

c. Le stationnement, un enjeu et une opportunité

Historiquement, le stationnement des riverains avait majoritairement lieu sur les parcelles privées (garages, parkings privés, etc.). Aussi les rues du quartier présentent très peu de places dédiées au stationnement. Seul le Boulevard Marechal Joffre et le Boulevard Aristide Briand, les deux axes parallèles à la mer les plus proches de la côte, offrent des places de stationnement identifiées. Les autres zones de stationnement représentées sur la Figure 2.37 correspondent à des stationnements privés liés à des parcelles comportant des résidences collectives. Aujourd'hui, le stationnement représente un enjeu pour le quartier, en effet avec la multiplication des véhicules par ménages, nombreux sont les riverains qui se garent sur les trottoirs, phénomène largement amplifié en périodes estivales où les trottoirs aux abords de la

mer sont utilisés comme espace de stationnement par les touristes. Ce stationnement « sauvage » entraîne la formation d'ornières sur les parties de trottoir en sable ou enherbé.

Cette situation pose question à la ville de Ouistreham. Un réaménagement de certaines rues pour créer des zones de stationnement et homogénéiser le revêtement des trottoirs est à l'étude. Un tel projet offrirait une opportunité d'aménagement intéressante pour le déploiement de revêtements perméables sur le quartier. Cet exemple concret s'inscrirait parfaitement dans la logique de penser de façon intégrée l'usage de la voirie et la gestion des eaux pluviales.

d. Hypothèse de modélisation, limiter l'étude au domaine public

Pour la suite de cette étude une hypothèse déterminante est posée ; dans le cadre de la modélisation des processus hydrologiques sur ce bassin versant, toutes les zones privées, à l'exception des parkings privés connectés à la rue, seront considérées comme autonomes du point de vue hydrologique. Cette hypothèse implique qu'aucun échange (aucun ruissellement) ne sera modélisé des parcelles privées vers le domaine public ou du domaine public vers les parcelles privées. Cette hypothèse s'appuie sur différents constats.

- **La priorité donnée à la rue.** Comme cela a été détaillé dans le chapitre 1, la rue est l'espace privilégié par ce travail pour différentes raisons. En suivant ce principe de travail, les efforts de modélisation se sont concentrés sur le domaine public et la rue en particulier.
- **Le fonctionnement hydrologique réel des parcelles.** En effet, compte tenu de la forte perméabilité du sol, la gestion des eaux pluviales est assurée à la parcelle avec des puits ou tranchées d'infiltration et une infiltration directe via les jardins. Une quantification précise n'a pas été effectuée dans le cadre de ce travail mais les observations de terrain et les informations transmises par la ville montrent qu'une large majorité de maisons possèdent leur propre puits d'infiltration. Cette situation s'explique également par la réglementation en vigueur sur le quartier qui impose une gestion à la parcelle des écoulements privés, même si la mise en œuvre de cette règlementation n'est pas toujours conforme sur le terrain.
- **L'hétérogénéité de parcelles privées.** En effet, tout comme cela a été souligné pour les trottoirs, les parcelles privées présentent une grande hétérogénéité. Compte tenu de l'importance de leur surface les choix pris pour traduire cette hétérogénéité auraient fortement influencés les résultats de la modélisation. Aussi, une description fine, avec observations systématiques sur le terrain, aurait été nécessaire pour représenter fidèlement les différents types d'occupation du sol, la gestion de l'eau en sortie de gouttière, les points de connexion entre parcelles privées et domaine public, etc. Un tel travail dépasse les moyens de cette étude et rencontre la difficulté de pénétrer dans les parcelles.
- **La capacité de calcul et les limites du logiciel Netlogo.** De façon très pragmatique, inclure l'ensemble des parcelles privées dans la modélisation entraînerait la création d'un trop grand nombre d'agents (Chapitre 4), au-dessus des limites du logiciel Netlogo. Pour pallier cette limite du logiciel, il faudrait réduire la zone d'étude ce qui serait en contradiction avec l'importance de représenter les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant soulignée dans le chapitre 1. Plutôt que la réduction de la taille du site d'étude il a donc été préféré d'exclure les parcelles privées de la modélisation. Compte tenu que ces parcelles représentent 69 % de la zone étudiée cela permet de passer de la modélisation de 457 181 cellules de 1 m^2 à « seulement » 141 590 cellules.

Malgré les éléments qui justifient cette hypothèse, un tel choix comporte de nombreuses limites qu'il convient de souligner. En effet, il est certain qu'il existe des connexions entre le ruissellement des parcelles privées et du domaine public. Les parcelles privées vont participer à la génération du ruissellement sur le domaine public notamment au niveau des sorties de gouttières dont certaines se déversent encore directement sur la rue. Inversement, le ruissellement du domaine public est régulièrement drainé par les parcelles privées. Ce phénomène intervient particulièrement au niveau des entrées de garages privés des rues proches du front de mer où les garages sont situés en contrebas de la rue. Cette hypothèse conduit donc à la fois à une minimisation de la génération du ruissellement et à une surestimation des quantités d'eau ruisselées dans certaines zones. La prise en compte de ces erreurs sera détaillée dans le chapitre 4.

2.3.2.3 OBSERVATIONS ET DONNÉES HYDRAULIQUES SUR LE QUARTIER *RIVA BELLA*

Même si l'objectif du modèle *PorousCity* n'est pas de reproduire fidèlement la réalité, il convient d'être capable de préciser avec quelle justesse le modèle est capable de représenter le ruissellement dans la situation actuelle de ce bassin versant. Des données hydrauliques de terrain sont donc nécessaires pour procéder à la vérification de la modélisation. Ce travail de vérification, présenté dans le chapitre 4, s'appuie d'une part, sur les comptes rendus réalisés par la mairie de Ouistreham suite à différentes inondations constatées sur le terrain, d'autre part sur l'expérience de la ville et des riverains quant-aux zones fréquemment inondées. Cette section présente ces informations.

a. Observations de terrain suite à des inondations

Parmi les différents comptes rendus d'évènements fournis par la mairie de Ouistreham, deux donnent des informations sur les inondations observées dans le quartier *Riva Bella* (Tableau 2.12). Les deux fois il s'agit d'une succession de deux orages d'été ayant lieu à une vingtaine d'heures d'intervalle.

Tableau 2.12 – Description des évènements et de leurs conséquences observées sur le quartier *Riva Bella,* d'après les informations des comptes rendus de la mairie de Ouistreham.

Évènement	Pluie	Débordements observés	Remarques
8 et 10 août 2014	Le 8 : 36 mm vers 22 heures Le 10 : 17 mm vers midi	Aux carrefours ▪ Bd. Briand/Av. Verdun ▪ Rue Casimir Delavigne/Bd de France	Nettoyages des puits d'infiltration et des grilles d'avaloirs concernées
11 juin 2015	32.7 mm en 4h de 20h à minuit (dont 17.6 mm de 22h et 23h)	*« Beaucoup d'eau »* ▪ Bd. Briand/Av. Verdun ▪ Bd. Briand/Rue Casimir Delavigne ▪ Bd. Briand/Rue Châteaubriand *« de l'eau »* ▪ Rue Fontenelle/Bd. Joffre ▪ Rue Boieldieu/Bd. Joffre *« normal »* ▪ Rue Casimir Delavigne/Bd. de France	Évènement pluvieux qui fait suite à plusieurs jours de soleil et vent du nord. Observations faites entre 23h20 et 23h37 soit après le pic de la pluie.
12 juin 2015	7.8 mm en 3h de 16h à 19h	▪ Boulevard Briand sous 25 cm d'eau au carrefour Verdun et Malherbe. ▪ Rue Fontenelle sous l'eau au niveau du carrefour avec la rue Joffre	Observations faites entre 18h et 18h15

Les conditions météorologiques données dans le Tableau 2.12 sont issues des informations fournies par la mairie de Ouistreham, elles-mêmes basées sur les relevés de la station d'épuration (STEP) de Ouistreham, située à environ 2 km du site d'étude. La description des débordements observés est visuelle et non quantitative.

Les données Météo France pour la station de Bernières-sur-Mer (station la plus proche du site d'étude, située à 12 km) ont été étudiées pour la journée du 11 juin 2015. Les données de la station de Bernières-sur-Mer présentent des différences importantes avec celle de la STEP, avec un cumul de précipitations de 17,1 mm contre 32,7 mm à la STEP de Ouistreham. La temporalité n'est pas la même non plus avec des précipitations comprises entre 18h et 21h30 à Bernières-sur-Mer et entre 20h et minuit à Ouistreham. Ces différences soulignent le caractère très localisé de cet épisode orageux. Elles soulignent également l'importance de la précision des données météorologiques en hydrologie urbaine.

La STEP étant elle-même située à 2 km environ de la zone d'étude qui s'étend sur plus de 1 km de long, il est probable que la pluie tombée sur le quartier *Riva Bella* n'ait pas été homogène et que la pluviométrie moyenne ne corresponde pas exactement à celle mesurée à la STEP.

b. Expériences des acteurs locaux sur les zones inondées

La discussion avec différents acteurs communaux, souvent eux-mêmes habitants du quartier *Riva Bella*, permet de compléter les informations transmises par la mairie de Ouistreham. En effet, selon les témoignages recueillis certaines autres zones sont régulièrement inondées. Ces informations sont localisées sur la Figure 2.43 qui présente les puits d'infiltrations, les observations de la mairie (en bleu) et celles issues des témoignages recueillis (en vert).

Cette carte illustre la correspondance entre les zones d'inondations constatées et la localisation des puits d'infiltration. Cette correspondance confirme la pertinence de l'utilisation de la localisation des puits d'infiltration comme un indicateur complémentaire des lieux d'accumulation du ruissellement.

En effet, comme cela été présenté précédemment, les puits d'infiltration ont été réalisés de façon empirique, là où les problèmes d'inondation survenaient. Aussi il est logique de les retrouver au niveau des zones inondées précédemment citées. Leur localisation est comparée avec les résultats des simulations de vérification du modèle dans le chapitre 4 pour vérifier si les zones d'accumulation du ruissellement modélisées correspondent bien à la présence d'un puits d'infiltration.

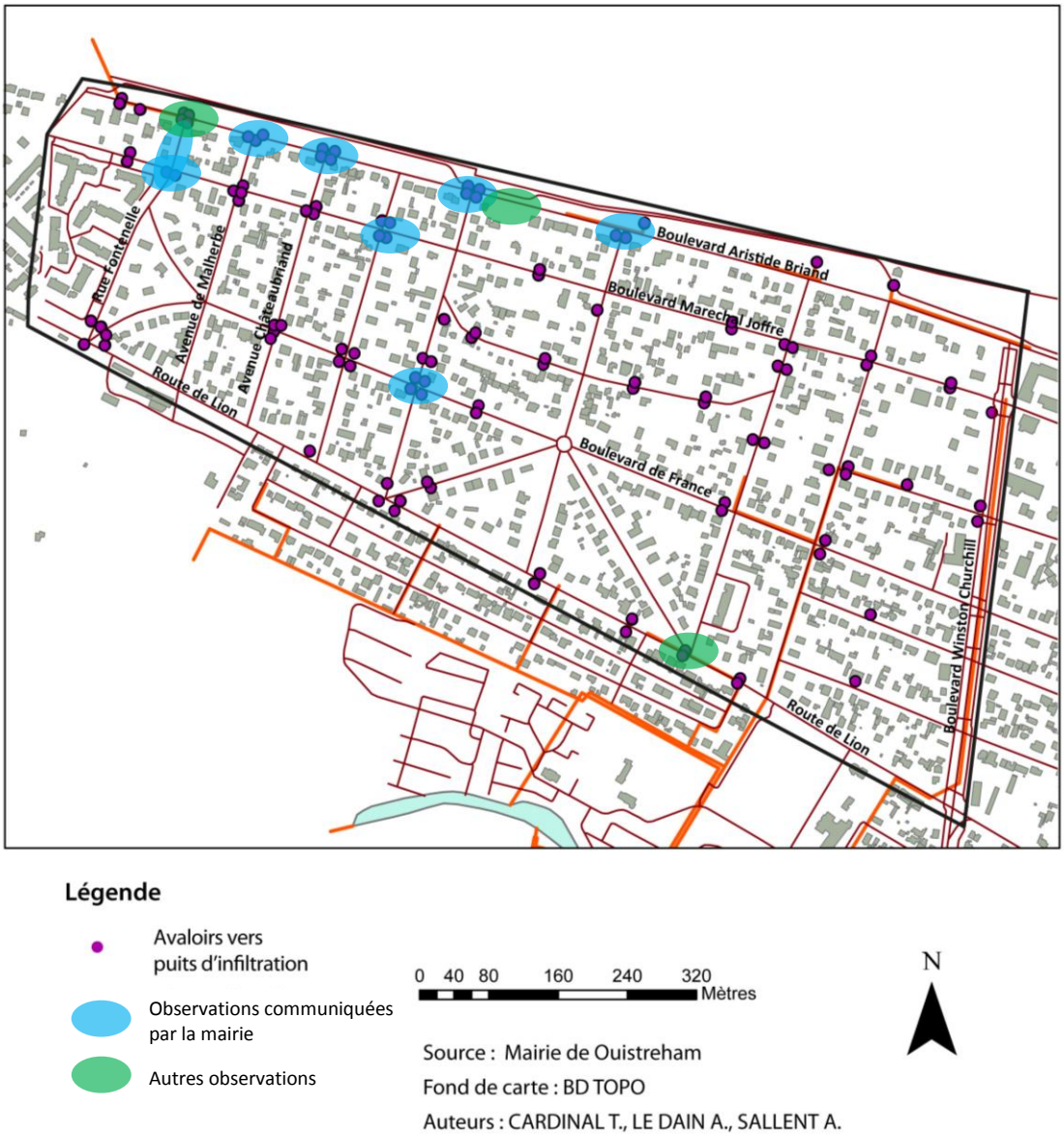


Figure 2.43 - Carte de localisation des zones de concentration du ruissellement observées sur le quartier *Riva Bella*.

SECTION 2.4

2.4 CARACTÉRISATION DES CONDITIONS CLIMATIQUES LOCALES

2.4.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU CLIMAT DE L'EX BASSE-NORMANDIE

L'étude des structures à revêtements perméables dépend largement des conditions météo-climatiques et notamment de la pluviométrie. Les données pluviométriques utilisées pour la modélisation peuvent être définies à partir de pluies synthétiques (construites à partir des coefficients de Montana par exemple), ou à partir de pluies réelles, correspondant à des pluies historiques. Des modèles de prédiction du climat peuvent également être utilisés, comme les données proposées dans le cadre des travaux du GIEC et disponibles via les points de grille des données DRIAS.

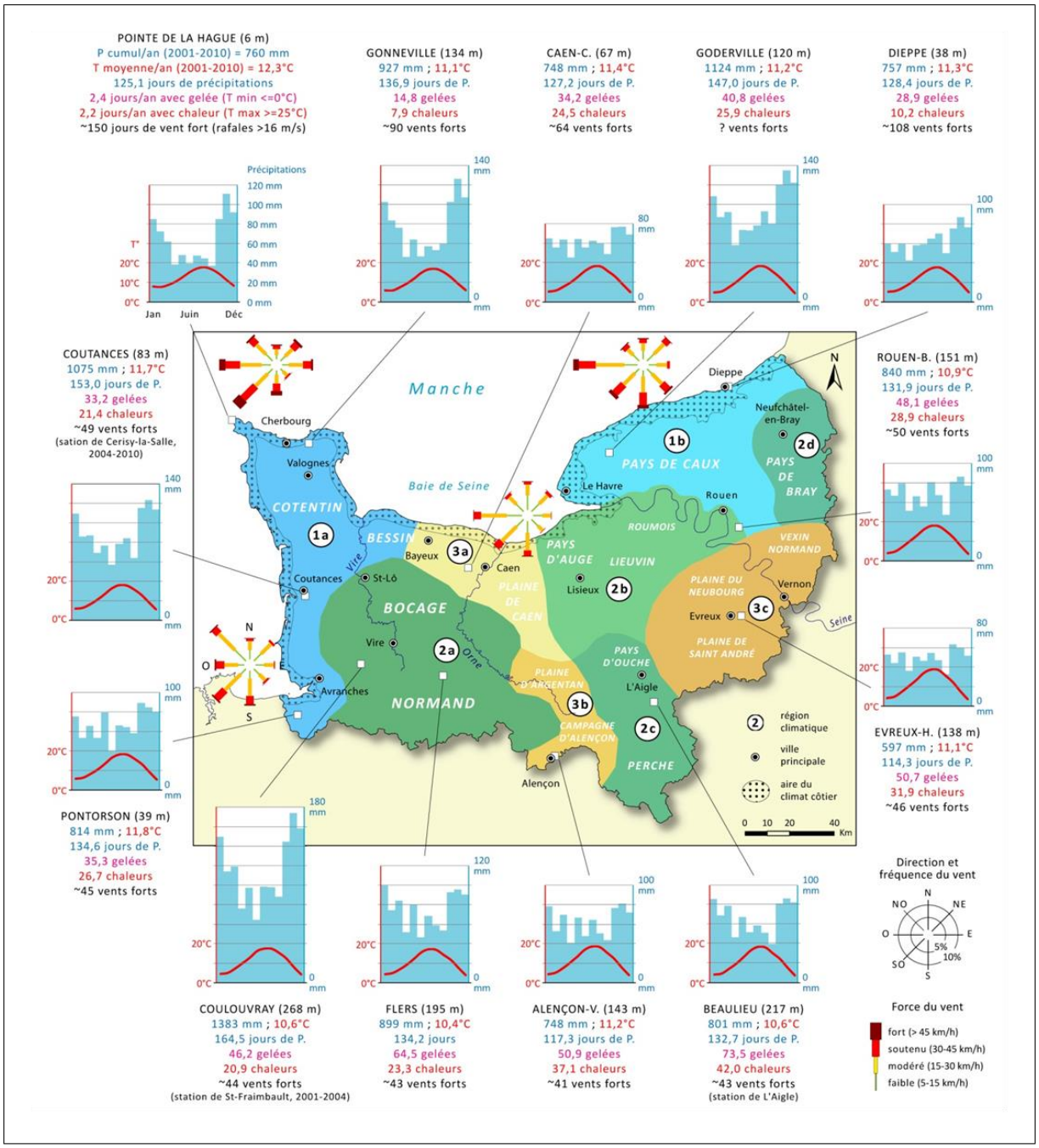
Compte tenu du contexte régional de ce travail de thèse il a été choisi d'utiliser comme donnée d'entrée des modèles des évènements pluvieux mesurés, historiques et locaux. Cette approche a l'avantage de permettre de comparer les sorties des modèles avec les observations faites sur le terrain lors des évènements en question. Elle facilite également l'appropriation du travail par un large public en faisant appel aux souvenirs que les interlocuteurs ont des évènements. Pour choisir les évènements qui seront utilisés comme données d'entrée de la modélisation, il est nécessaire de définir différentes catégories de pluie qui seront représentatives de la réalité des évènements historiques locaux. Pour définir ces différentes typologies, la pluviométrie régionale et locale a été caractérisée et est présentée dans cette sous-section qui donne un aperçu général du climat de l'ex Basse-Normandie dans le but d'introduire le contexte de l'analyse développée dans cette section. Les spécificités liées au littoral et celles liées au secteur d'étude sont ensuite détaillées.

2.4.1.1 LE CLIMAT DE L'EX BASSE-NORMANDIE

La Normandie est sous l'influence des masses d'air en provenance de l'Atlantique et présente un climat océanique tempéré. Les précipitations sont reparties sur l'ensemble de l'année, et diminuent globalement d'ouest en est (de 1100 à 700 mm par an). L'océanité engendre une faible amplitude saisonnière des températures (de 10 à 15°C d'écart entre janvier et juillet) qui augmente des côtes vers l'intérieur des terres (Cantat et al., 2018). Une synthèse des principaux ensembles climatiques normands a été réalisée dans le cadre de la réalisation du fascicule « Le Climat » du Profil Environnemental Régional de la Normandie à paraitre en 2018 (Figure 2.44) (Cantat et al., 2018). Trois types d'ensembles climatiques sont distingués : les climats (1) maritimes, (2) contrastés des collines et (3) d'abri des plateaux. La zone d'étude de ce travail, Ouistreham et Caen, appartient au troisième ensemble, avec un climat dit « d'abri des plateaux » qui s'explique par la présence à l'Ouest du Cotentin et du bocage normand, zones d'altitude plus importantes qui protègent des vents dominants (Cantat et Brunet, 2001).

Les principaux ensembles climatiques normands

Familles de climats : (1) maritime ; (2) contrasté des collines ; (3) d'abri des plateaux ; + côtier (plus venté, moins arrosé).



Document de synthèse dessiné à partir de cartes de température et de précipitations réalisées d'après les données Drias CNRM 2014 Météo-France en points de grille (maille de 8 km de côté, voir cartes pages suivantes) et inspirée des cartes de l'Atlas de Normandie réalisées par Jean-Paul TRZPIT (1965) et de la thèse de Gisèle ESCOURROU (1978).

Les 13 diagrammes ombrothermiques sont tracés à partir de données Météo-France sur la période 2001-2010. Les 4 roses des vents littorales sont dessinées à partir des données du modèle Aladin Météo-France sur la période 1999-2009.

Nota : Caen-C. = Caen-Carpiquet ; Rouen-B. = Rouen-Boos ; Evreux-H. = Evreux-Huest ; Alençon-V. = Alençon-Valframbert

Réalisation : Olivier CANTAT, Université de Caen Normandie, LETG Caen, UMR 6554 CNRS, 2018.

Figure 2.44 – Synthèse des principaux ensembles climatiques normands (Cantat et al., 2018)

La carte des précipitations (Figure 2.45) illustre la division de la pluviométrie sur l'ex Basse Normandie avec à l'Ouest plus de précipitations qu'à l'Est. Cette inégalité dans la pluviométrie s'explique par une altitude plus importante à l'Ouest (ascendance orographique et phénomène de blocage), et par la trajectoire générale d'Ouest en Est des dépressions et des fronts pluvieux. Les précipitations ont lieux principalement en automne et en hiver lorsque la dépression d'Islande descend vers le Sud. En été avec le renforcement et le gonflement de l'anticyclone polaire sud, l'ensemble de la circulation atmosphérique générale est repoussée vers le Nord. La Basse-Normandie est alors sous l'influence de l'anticyclone des Açores apportant un temps sec et chaud. Il faut néanmoins noter que l'ex Basse-Normandie se situe à la limite des hautes pressions, les passages pluvieux sont fréquents (Cantat et al., 2015).

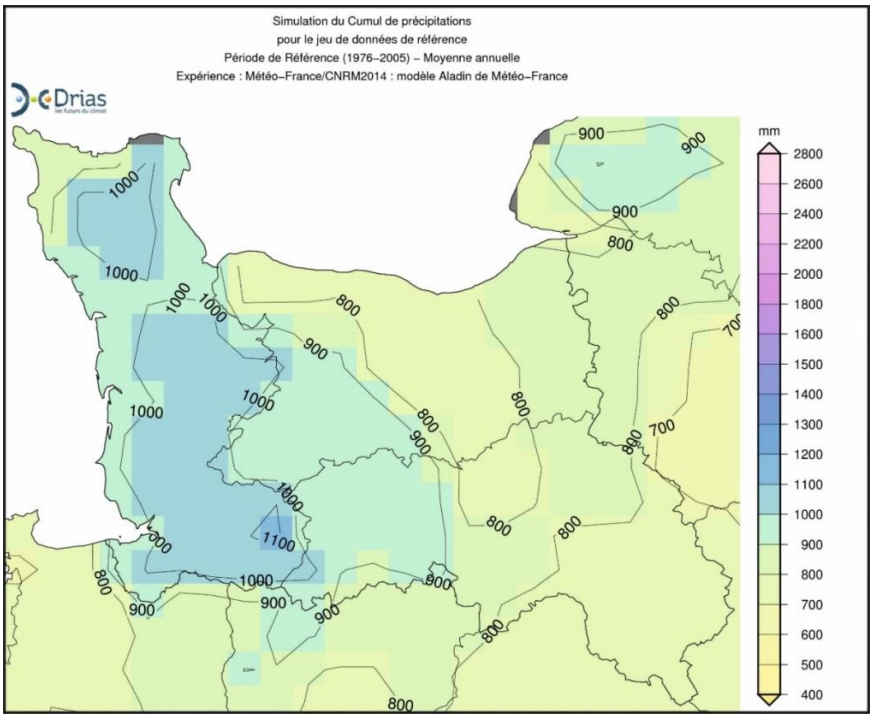


Figure 2.45 : Carte des cumuls de précipitation annuel sur l'ex Basse Normandie d'après le DRIAS

Pour plus de précisions sur le climat régional, se reporter à la fiche climatologique de la station de Caen-Carpiquet sur la Normale 1981-2010 (Annexe D, source Météo-France) et aux synthèses réalisées par J.-P. TRZPIT dans l'Atlas de Normandie (Trzpit, 1965) et O. CANTAT dans le fascicule « Le climat » du Profil Environnemental Régional de Basse-Normandie (Cantat et al., 2015).

2.4.1.2 LES SPÉCIFICITÉS DU LITTORAL

La bande littorale est sous l'influence directe de la mer de la Manche qui va refroidir le climat l'été et le réchauffer en hiver. Ce phénomène appelé « climat côtier » se concentre sur une bande de terre d'une dizaine de kilomètres (Roupsard, 1998). Proches de la côte, Caen et Ouistreham sont influencés par ce climat, caractérisé par plus de vent et moins de précipitations qu'à l'intérieur des terres (Cantat et al., 2015). Ce climat côtier limite le risque de dégradation par gel/dégel des revêtements perméables. Comme le montre la Figure 2.46, le nombre de jours annuel moyen de gel/dégel reste inférieur à 20 sur la zone d'étude et de façon générale inférieur à 30 jours par an sur la bande du littorale. C'est la conséquence de l'inertie thermique forte des océans renforcée par l'influence du courant chaud, le « Gulf stream ».

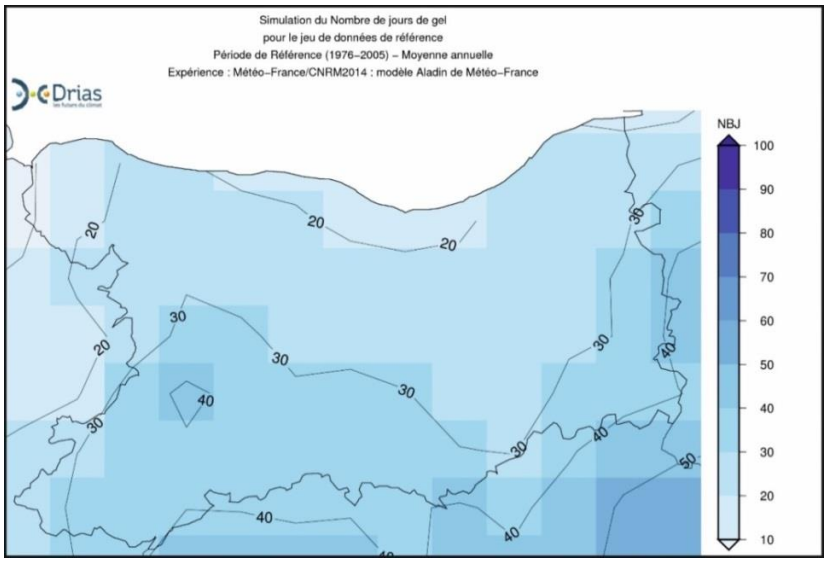


Figure 2.46 : Carte du nombre de jours de gel moyen par an sur le Calvados d'après le DRIAS

2.4.1.3 LES SPÉCIFICITÉS DU SECTEUR D'ÉTUDE

La station météorologique Météo-France de Bernières-sur-Mer a été retenue pour donner une première caractérisation du climat local au plus proche du site d'étude. La station de Bernières-sur-Mer se situe en proximité directe avec la mer (à environ 200 mètres) dans un secteur dunaire à 14 kilomètres du quartier Riva Bella. Les données utilisées vont de 2002 à 2016.

La moyenne annuelle des précipitations à Bernières-sur-Mer sur la période 2002-2016 est de 679 mm (avec comme valeurs extrêmes, 823 mm en 2006 et 579 mm en 2003), et celle des températures de 11,6°C. Les précipitations ont lieu principalement en automne et en hiver, et c'est durant le printemps qu'elles sont les plus faibles (Figure 2.47). Le diagramme ombrothermique[11] souligne l'absence de mois secs, la courbe des températures reste constamment en-dessous de celle des précipitations.

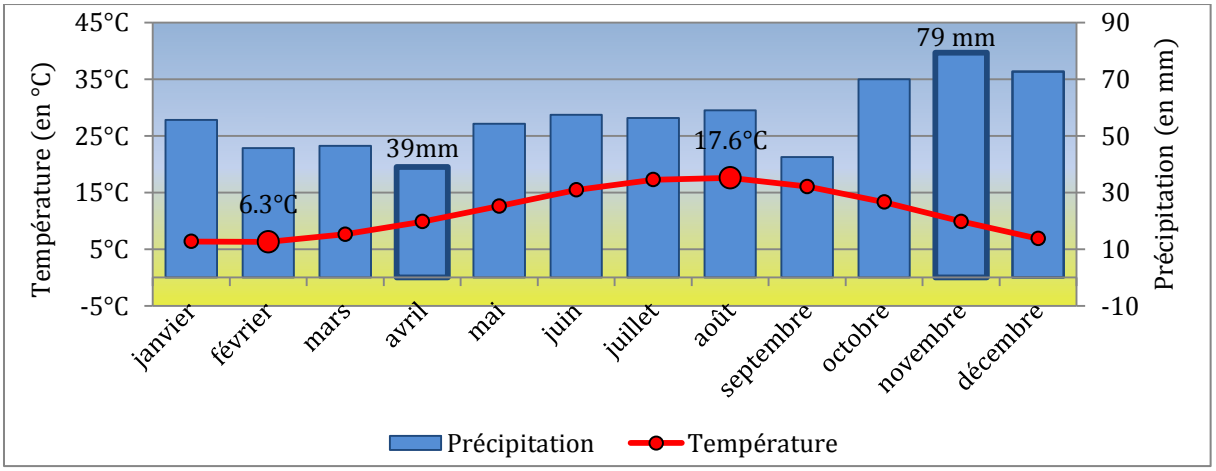


Figure 2.47 - Diagramme ombrothermique de la station de Bernières-sur-Mer. Graphique réalisé d'après des données Météo France sur la période 2002-2016 (Cardinal et al., 2017)

[11] Le diagramme ombrothermique désigne une représentation graphique indiquant les variations conjointes de la température moyenne et des pluies mensuelles en un lieu donné. Les échelles des axes des ordonnées de température et de précipitation sont tracées en respectant la relation entre la pluie (P) et la température (T) : $P = 2 \cdot T$. Par exemple, une température de 10°C est représentée sur la même ligne horizontale qu'une précipitation de 20mm. Un mois est considéré sec si la courbe des températures passe au-dessus de la hauteur de précipitation.

Les précipitations journalières sont principalement comprises entre 0 et 5 mm. Les précipitations importantes comprises entre 10 et 20 mm sont rares, 4 %, et seulement 1 % sont supérieures à 20 mm (3 jours par an en moyenne). La pluviométrie journalière la plus importante connue sur cette station sur la période 2002 à 2016 est de 65,7 mm (4 juillet 2006).

2.4.2 CARACTÉRISATION DE LA PLUVIOMÉTRIE

Cette sous-section vise à caractériser les données pluviométriques locales dans le but de définir un nombre représentatif de typologies (régimes) de pluie qui seront ensuite utilisées comme données d'entrée des modèles. Une telle classification peut être faite à partir des données pluviométriques nettes (pluie réelle) ou au regard des conséquences (débits) engendrées par la pluie au sein des structures perméables. La classification retenue pour ce travail s'inspire des deux approches. Les données utilisées proviennent de la station Météo France de Caen-Carpiquet qui présente les données les plus exhaustives localement sur une longue période. Deux types de données sont utilisés : les données pluviométriques journalières, enregistrées à la station depuis 1945, et les données pluviométriques au pas de temps 6 minutes, disponibles depuis 2006.

Après un premier point introductif sur l'importance de considérer les débits engendrés, cette sous-section présente la synthèse de l'analyse réalisée sous la forme d'une méthodologie de classification de la pluviométrie. Cette méthodologie se veut pragmatique, partant des données les plus facilement accessibles puis affinant l'analyse. Elle a été suivie pour construire la classification pluviométrique utilisée dans la suite de ce travail de thèse et présentée à la fin de cette sous-section.

2.4.2.1 CLASSIFICATION AU REGARD DES DÉBITS ENGENDRÉS

La donnée d'entrée importante pour cette étude n'est pas tant une valeur de précipitation mais plutôt la capacité de cette dernière à engendrer un ruissellement. En effet, toutes les pluies ne sont pas « efficaces » pour engendrer un débit entrant dans le système perméable, notamment en Normandie où 50 % des pluies journalières sont inférieures à 2 mm. L'ouvrage de LAMBERT, (Lambert, 1995), propose une approche intéressante pour mieux appréhender la notion de pluie. Pour classer les précipitations, l'auteur propose de retenir non pas leur genèse (amont) mais ce qu'elles provoquent (aval), donc quel est le devenir de l'eau tombée. Ce devenir va être fonction :

- de la nature des précipitations (solide ou liquide) ;
- de leur intensité et de leur durée ;
- du contexte temporel (évènements précédents, période de l'année…) ;
- de l'étendue et de la localisation de l'évènement.

Ainsi, LAMBERT (Lambert, 1995) décompose la pluie totale d'un épisode pluvieux en différentes catégories de pluie qui sont réadaptées ci-dessous au contexte de l'étude des structures perméables ($P_{totale} = P_o + P_\varepsilon + P_c + P_i + P_a$). Les précipitations neigeuses ne sont pas considérées ici.

Tableau 2.13 – Description des précipitations selon leurs conséquences. Adapté de (Lambert, 1995)

Nom		Description	Débits engendrés
Les précipitations occultes	P_o	Ne tombent pas dans le pluviomètre et ne sont donc pas comptabilisées mais existent réellement dans le déroulement du cycle de l'eau (brouillard, rosée, etc.), particulièrement important en Normandie.	$Q_e = 0$
Les pluies d'interception	P_ε	Trop faibles pour provoquer un ruissellement, elles mouillent seulement la surface du sol, sont piégées dans les dépressions et sont évaporées.	$Q_e = 0$
Les pluies d'humectation	P_c	Provoquent un écoulement qui parvient jusqu'à la structure perméable. Le débit entrant est absorbé par la rétention capillaire de la structure. L'eau n'atteint pas le fond de la structure et est évacuée par évaporation.	$Q_e > 0$ $Q_{s\_drain} = 0$ $Q_{s\_inf} = 0$ $Q_{s\_evap} > 0$
Les pluies d'infiltration	P_i	Le ruissellement engendré entre dans une structure déjà humectée. L'eau peut ainsi percoler à travers les vides et rejoindre le fond de la structure où elle est ensuite évacuées par drainage et/ou infiltration.	$Q_e > 0$ $Q_{s\_drain} > 0$ $Q_{s\_inf} > 0$
Les pluies d'averses ruisselantes	P_a	Le ruissellement à la surface des pavés n'entre pas dans la structure perméable, soit parce que les précipitations dépassent la capacité d'infiltration des pavés (peu probable hors cas de colmatage sévère), soit parce que la structure est déjà saturée (peu probable également).	$Q_e = 0$ $Q_{s\_rui} > 0$

Pour aller au bout de cette démarche de classification par les débits engendrés, il faudrait être en mesure d'associer un unique comportement hydrologique à la structure pour une pluie donnée. Or le comportement hydrologique de la structure ne va pas dépendre seulement de la pluie mais également des paramètres liés à la structure elle-même et du site où elle est implantée. La pluie représente un paramètre parmi d'autres, aussi la classification des différentes typologies de pluie sera construite dans le cadre de cette étude à partir des données pluviométriques et non de leurs conséquences.

Cependant, cette classification permet de dégager plusieurs observations que LAMBERT souligne dans son ouvrage et qui ont guidé la méthodologie de classification.

- Pour un contexte et une structure donnée, il est possible de définir les différents seuils (P_ε, P_c, P_i, P_a) sous la forme d'une lame d'eau. En première approche, il semble donc pertinent de proposer une classification basée sur le cumul de précipitations (par exemple les pluies inférieures à P_ε seraient négligeables). Une telle classification peut s'obtenir à partir des données journalières (2.4.2.2).
- L'analyse des précipitations ne doit cependant pas se limiter à la valeur du cumul de pluie précipitée mais doit prendre en compte l'intensité des évènements. En effet, pour une même quantité d'eau précipitée la dynamique peut faire passer la pluie de P_c à P_i voire à P_a (2.4.2.3).
- Il est important de tenir compte des évènements précédents (état initial du sytème) lors de l'analyse d'une pluie et de ses conséquences. En effet, la même pluie à la fin d'une période sèche ou quelques heures après un premier évènement pluvieux n'engendrera pas les mêmes débits. Ainsi, en plus de l'étude des seuls évènements pluvieux, il convient de s'intéresser aux séries d'évènements (2.4.2.4).

2.4.2.2 CLASSIFICATION À PARTIR DES CUMULS JOURNALIERS.

En première approche, les données de cumuls de précipitations journalières sont utilisées. Les relevés de la station de Caen-Carpiquet utilisés vont de 1945 à 2017. L'analyse permet une première classification fondée sur les occurrences de retour de la pluviométrie journalière. Il s'agit d'un découpage établi d'après la répartition du nuage de points qui représente les précipitations journalières en fonction de leur quantité et du jour de l'année, noté de 1 à 365 (Figure 2.48). Cette approche empirique permet de dégager assez nettement sept classes (Figure 2.48 et Tableau 2.14) et de délimiter ainsi des seuils caractérisant les épisodes pluvieux selon leur occurrence : fréquent, occasionnel, rare, très rare, et extrême.

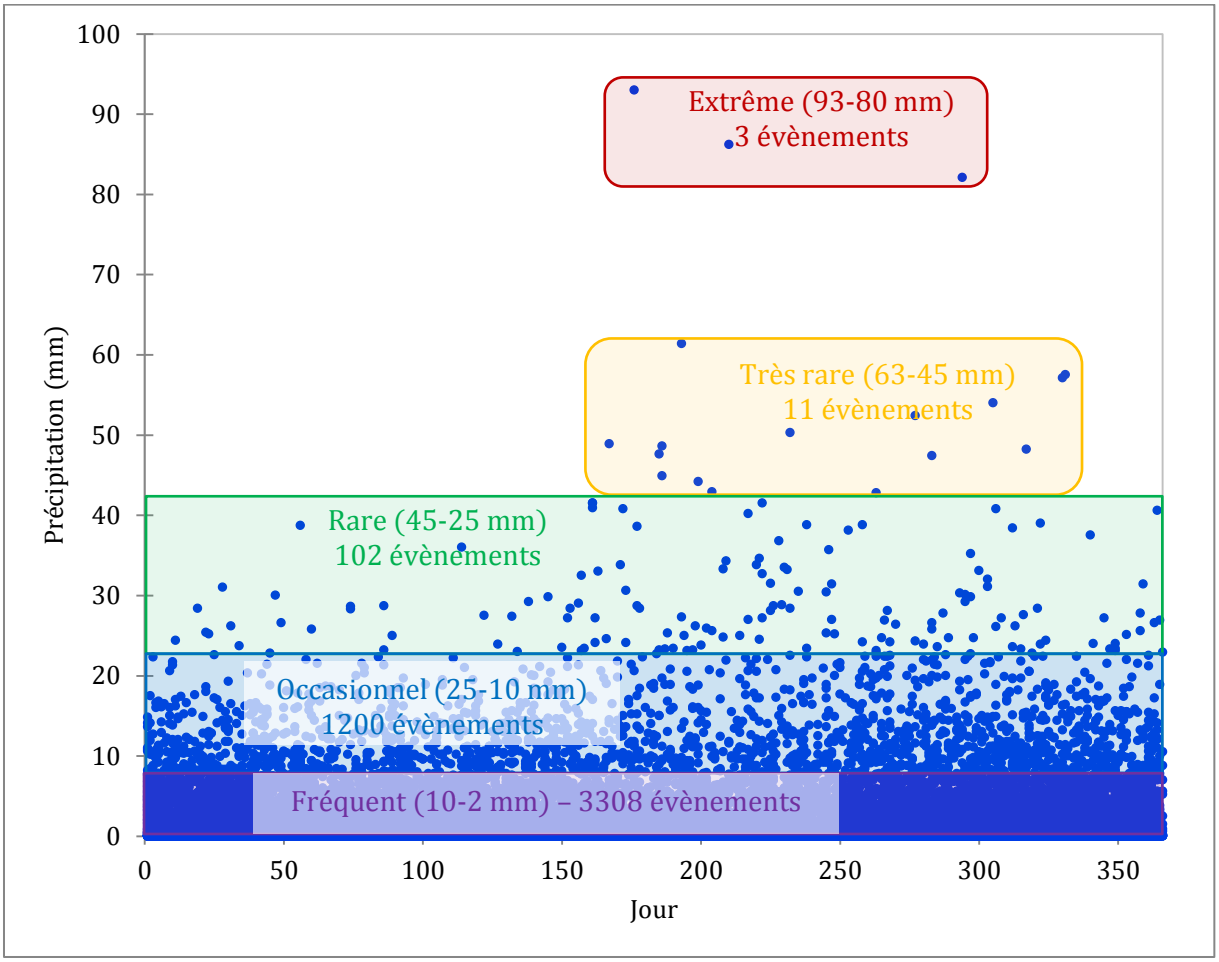


Figure 2.48 – Nuage de points des précipitations journalières sur Caen en fonction du jour de l'année (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet)

Tableau 2.14 – Classification des précipitations sur Caen à partir des données pluviométriques journalières (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet)

Cumul journalier	Pluie	Occurrences	% Jours	% Jours cumulés	Nombre jours/an
	mm	*Nombre*	*% jour/an*	*% jour/an*	*Nombre*
Extrême	≥ 90	1	0.00	0.00	0.01
	85-90	1	0.00	0.01	0.01
	80-85	1	0.00	0.01	0.01
Très Rare	60-65	1	0.00	0.02	0.01
	55-60	2	0.01	0.02	0.03
	50-55	3	0.01	0.03	0.04
	45-50	5	0.02	0.05	0.07
Rare	40-45	12	0.05	0.10	0.16
	35-40	12	0.05	0.14	0.16
	30-35	23	0.09	0.23	0.32
	25-30	55	0.21	0.44	0.76
Occasionnel	20-25	135	0.51	0.94	1.85
	15-20	284	1.07	2.01	3.90
	10-15	781	2.94	4.95	10.73
Fréquent	5-10	2168	8.16	13.11	29.78
	2-5	3308	12.45	25.56	45.44
< 2	0-2	6773	25.49	51.05	93.04
Sans pluie	0	13005	48.95	100.00	178.65

Le principal intérêt de cette analyse des cumuls de précipitations journalières est de mettre en évidence les journées avec les cumuls les plus importants et leur saisonnalité. La catégorie « extrême » se dégage très nettement du reste des cumuls journaliers, comme cela est souligné par la Figure 2.49 qui présente la pluie journalière en fonction du nombre d'occurrences.

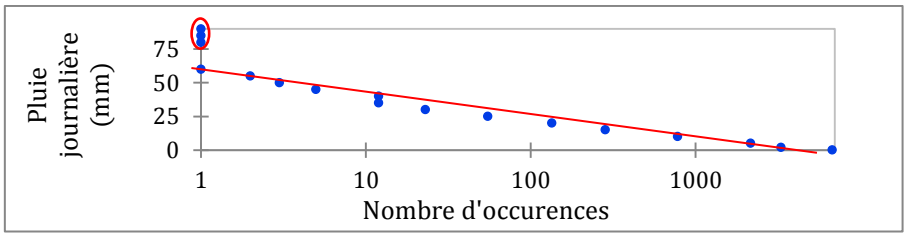


Figure 2.49 – Pluie journalière en fonction du nombre d'occurrences des valeurs de précipitation

Une telle analyse est adaptée pour faire émerger une classification des journées avec une pluviométrie supérieure à 25 mm (seuil correspondant à un palier dans les occurrences de pluie, (Tableau 2.14). Dans le cas présent trois catégories sont identifiables, celle dite « extrême » (≈ > 80 mm/jour) avec trois évènements qui se détachent des autres et qui présentent une forte saisonnalité (été-automne, mais échantillon très faible). Celle dite « très rare » (≈ 45-60 mm/jour) avec des évènements de période de retour supérieurs à 15 ans et qui présente une saisonnalité marquée en été-automne principalement, débordant possiblement sur la fin du printemps et le début de l'hiver météorologique. Enfin, une troisième catégorie dite « rare » (≈ 25-45 mm/jour) avec des évènements présents toute l'année mais plus fréquents en été et en automne, soulignant le rôle majeur des masses d'air chaud (forte charge possible en vapeur d'eau) et/ou instables (conflit thermique entre un sol échauffé surmonté d'un air plus froid) durant ces saisons.

Cependant, cette analyse par cumuls journaliers semble limitée pour analyser les jours où le cumul de pluie est inférieur à 25 mm. En effet, un jour avec un cumul de 20 mm tombé en 3h (comme le 22/07/2013) ou un jour avec un cumul de 20 mm tombé en presque 24h (comme le 12/10/2005) ne vont pas entraîner les mêmes conséquences et ne peuvent pas être classés dans la même catégorie. De plus, les cumuls journaliers ne permettent pas de travailler directement sur les évènements pluvieux. Ils fusionnent plusieurs pluies tombées dans la même journée ou inversement divisent une même pluie tombée sur deux jours différents. Une classification complémentaire qui s'appuie sur les évènements et leur intensité est donc nécessaire, notamment pour les évènements occasionnels et courants.

2.4.2.3 CLASSIFICATION À PARTIR DES INTENSITÉS DES ÉVÈNEMENTS

La deuxième étape de la méthodologie de classification proposée consiste à considérer les évènements et à les classer notamment au regard de leur intensité et de leur saisonnalité. Une telle analyse nécessite l'accès à des données plus fines, au pas de temps horaire ou 6 minutes par exemple. De telle données ne sont généralement pas disponibles sur de longues chroniques de temps (depuis 2006 dans le cadre de ce travail) ce qui limite leur usage pour l'identification des évènements les plus extrêmes. Le Tableau 2.15 présente les données analysées et propose une classification fondée sur les paliers d'intensité qui se dégagent le plus nettement.

Tableau 2.15 - Classification des précipitations à partir des intensités des évènements (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet)

Évènement	Intensité	Compte	% Évènements	% évènements cumulés	Nombre évènements / an
	mm/min	*Nombre*	*% évènement/an*	*% évènement/an*	*Nombre*
Extrême	$5{,}00\cdot10^{-1}$	1	0,02	0,02	0,09
	$4{,}20\cdot10^{-1}$	3	0,05	0,07	0,27
	$3{,}80\cdot10^{-1}$	1	0,02	0,09	0,09
Très intense	$2{,}92\cdot10^{-1}$	5	0,09	0,18	0,45
	$2{,}83\cdot10^{-1}$	4	0,07	0,25	0,36
	$2{,}33\cdot10^{-1}$	7	0,12	0,37	0,64
	$2{,}00\cdot10^{-1}$	7	0,12	0,50	0,64
Intense	$1{,}67\cdot10^{-1}$	13	0,23	0,73	1,18
	$1{,}50\cdot10^{-1}$	11	0,20	0,92	1,00
	$1{,}33\cdot10^{-1}$	26	0,46	1,39	2,36
	$1{,}17\cdot10^{-1}$	22	0,39	1,78	2,00
	$1{,}00\cdot10^{-1}$	43	0,76	2,54	3,91
	$8{,}33\cdot10^{-2}$	43	0,76	3,31	3,91
Moyen	$6{,}67\cdot10^{-2}$	171	3,04	6,35	15,55
	$5{,}00\cdot10^{-2}$	205	3,65	9,99	18,64
Courant	$3{,}33\cdot10^{-2}$	2743	48,78	58,78	249,36
Faible	$2{,}22\cdot10^{-2}$	530	9,43	68,20	48,18
Très faible	$2{,}00\cdot10^{-2}$	153	2,72	70,92	13,91
	$1{,}67\cdot10^{-2}$	368	6,54	77,47	33,45
	$1{,}33\cdot10^{-2}$	314	5,58	83,05	28,55
	$1{,}11\cdot10^{-2}$	276	4,91	87,96	25,09
Négligeable	$8{,}33\cdot10^{-3}$	339	6,03	93,99	30,82
	0,00	338	6,01	100,00	30,73

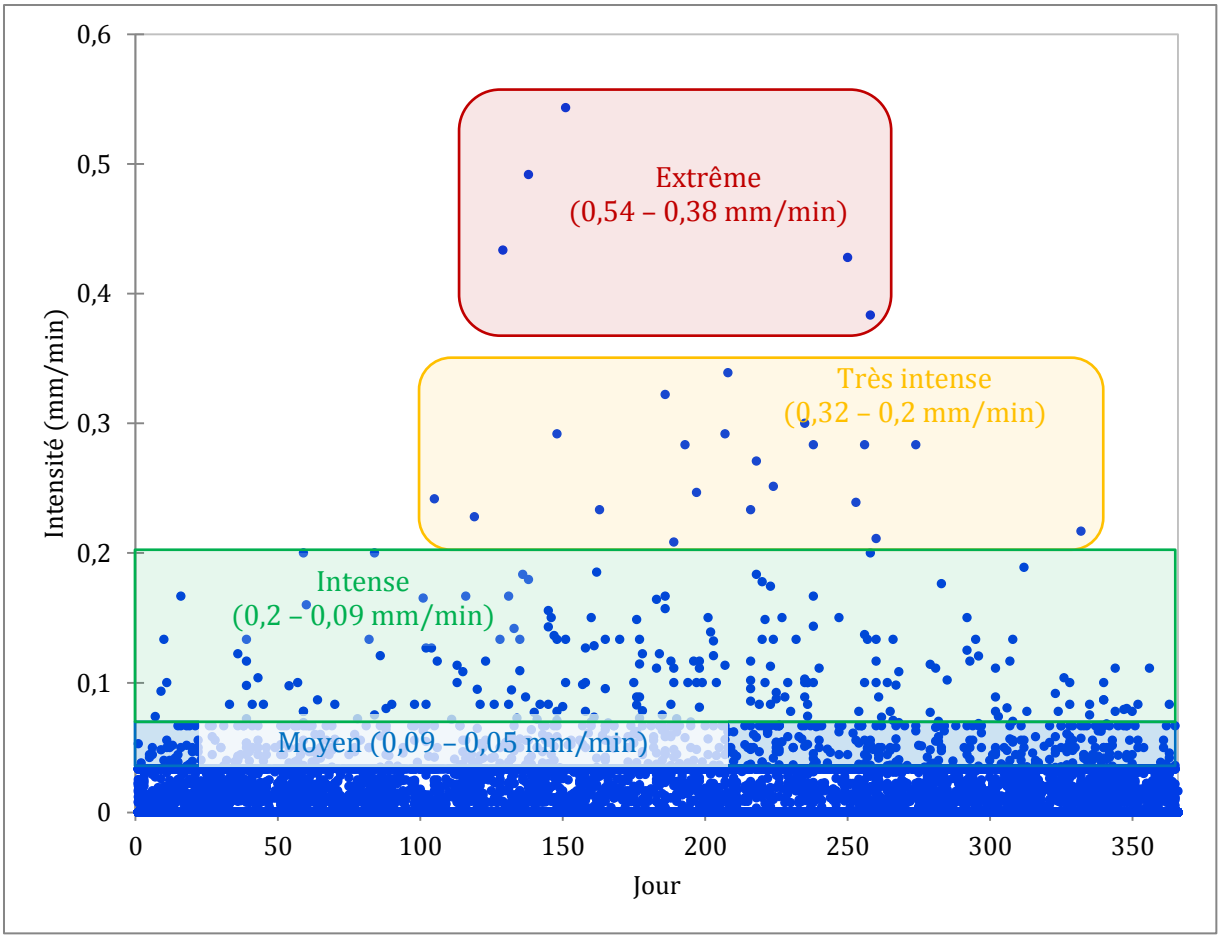


Figure 2.50 - Nuage de points des intensités des évènements sur Caen en fonction du jour de l'année (Source Météo France, station Caen-Carpiquet)

La classification proposée met très nettement en évidence l'existence d'une plage d'intensité largement dominante, avec près de 50 % des évènements compris entre 0,022 et 0,033 mm/min (soit entre 1,33 et 2 mm/heure). Cependant, il faut noter ici que 88 % des évènements de cette catégorie ont un cumul de précipitation inférieur à 1 mm. Vient ensuite une catégorie dite « de faible intensité » avec 10 % des évènements compris entre 0,02 et 0,022 mm/min (soit entre 1,2 et 1,33 mm/heure). 30 % des évènements ont une intensité encore plus faible et peuvent être négligés en tant qu'évènements indépendants (certains seront néanmoins considérés dans l'étude des séries d'évènements).

Concernant les fortes intensités une catégorie se détache des autres avec cinq évènements d'intensité supérieure à 0,38 mm/min (soit 23 mm/heure). Ces évènements ont eu lieu en juin (les trois les plus intenses) et en septembre. En ne considérant que leur intensité, ils pourraient apparaitre comme des évènements majeurs à étudier. Cette proposition change en regardant leur cumul de précipitations, ces cinq évènements ont un cumul compris entre 6,9 et 16,3 mm, tombé respectivement entre 18 et 30 minutes. Il s'agit donc d'averses intenses et très courtes mais certainement pas des évènements les plus sévères concernant la génération de ruissellements durables et massifs. Une analyse similaire peut être conduite sur la catégorie dite « très intense » qui regroupe à la fois des évènements de 1,8 mm en 6 minutes et des évènements allant jusqu'à 24,4 mm en 72 minutes. Ces évènements n'engendreront absolument pas les mêmes ruissellements. Ces catégories ne semblent donc pas pertinentes pour dégager une typologie des évènements majeurs.

Le constat précédent illustre l'importance de la notion d'intensité-durée-fréquence pour l'analyse des évènements pluviométriques. En effet, ce n'est pas par leur seule durée, ou leur seule intensité que la sévérité des évènements peut être classée, mais en croisant ces deux informations. La Figure 2.51 illustre cette remarque en représentant l'intensité des évènements étudiés en fonction de leur durée. Il apparait immédiatement que les évènements les plus intenses ont généralement une courte durée. Cependant comme souligné précédement, ils ne seront pas nécessairement les plus rares ni les plus sévères dans leurs conséquences. En effet, la fréquence croit à mesure que les points s'écartent des deux axes comme l'illustre les courbes IDF tracées à partir des valeurs des coefficients de Montana pour la station Caen-Carpiquet. Ce graphique met en avant que l'évènement le plus exceptionnel de la série étudiée est celui du 25/06/2006 avec une intensité de 0,15 mm/min et une durée de 522 minutes. Aucun des autres évènements ne dépasse la courbe de période de retour 10 ans.

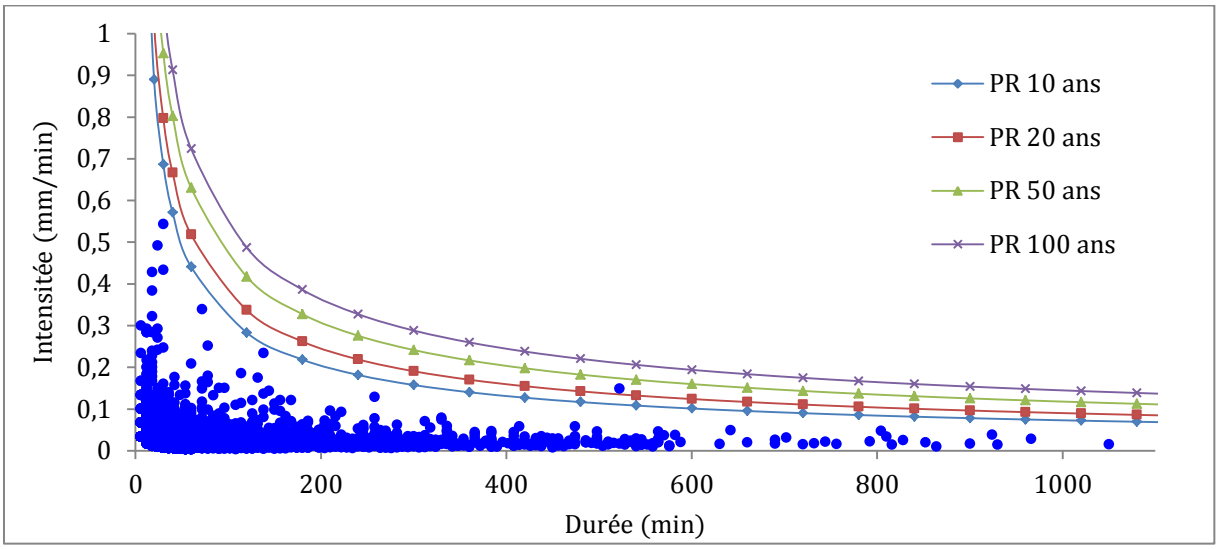


Figure 2.51 - Graphique Intensité-Durée des évènements pluviométriques de 2006 à 2017, comparés aux courbes intensité-durée-fréquence (IDF) construites à partir des coefficients de MONTANA pour la station Caen-Carpiquet.

En conclusion, l'analyse des intensités des évènements donne un éclairage intéressant et complémentaire sur les données pluviométriques. Elle est largement à privilégier à l'analyse des seuls cumuls journaliers pour les évènements dit « courants » ou « occasionnels » (intensités dites : moyenne, faible voire très faible). En revanche, l'intensité seule ne semble pas pertinente pour classifier les évènements dit « extrêmes » ou « rares » (intensités dites : « extrême, très intense ou intense »). Il convient de la croiser avec la durée des évènements et d'analyser la relation intensité-durée pour mettre en évidence les évènements exceptionnels.

2.4.2.4 CLASSIFICATION À PARTIR DU CUMUL DE PRÉCIPITATION DES SÉRIES D'ÉVÈNEMENTS

La troisième étape de la méthodologie proposée consiste à s'intéresser aux séries d'évènements. En effet, pour le moment les deux premières approches permettent de classer les évènements (ou journées) avec des cumuls importants (> 25 mm), ou les évènements plus courants en fonction de leur intensité. Mais cette représentation ne permet pas d'identifier les situations où plusieurs évènements de moindre importance sont rapprochés les uns des autres et peuvent, par accumulation, entraîner des conséquences importantes.

Pour étudier les séries d'évènements, deux démarches sont possibles. Avec les seules données de cumuls journaliers, il est possible de réaliser des cumuls de précipitations sur 2, 3, 4 ou 5

jours glissants. Cette méthode permet d'identifier des cumuls importants mais donne une représentation amplifiée du phénomène puisque des évènements parfois séparés de plus de 48 h peuvent être réunis ensemble (dans le cas d'un cumul sur 3 jours glissants par exemple). Quand elles sont disponibles, l'utilisation des données horaires ou minutes semble plus pertinente. Elle permet alors de fixer un seuil au-dessous duquel deux évènements indépendants sont considérés comme faisant partie de la même série. Dans le cadre de ce travail un seuil de 24 heures d'abscence de pluie a été retenu, en accord avec les recommandations de dimensionnement qui préconisent, dans leur grande majorité, un temps de vidange maximum de 24 heures pour les structures perméables. Le Tableau 2.16 présente les données et la classification retenue.

L'analyse est réalisée sur les cumuls de précipitations par série et non sur leur intensité. En effet, l'intensité des séries est calculée par apport à leur durée totale, aussi les valeurs d'intensité les plus fortes ne correspondent pas aux séries avec des fortes précipitations mais à des évènements isolés, même très faibles, dont le calcul d'intensité ne comprend pas de période sans pluie. Par ailleurs, la dynamique de génération des conséquences des séries d'évènements n'est pas tant liée à l'intensité des précipitations mais plus à une saturation progressive de la surface du sol puis de la structure perméable. C'est donc bien la quantité totale précipitée au sein d'une même série d'évènements qui est déterminante pour considérer les conséquences engendrées.

Tableau 2.16 – Classification des précipitations sur Caen à partir des cumuls de précipitation des séries d'évènements (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet)

Série	Cumul	Compte	% Séries	% Séries cumulées	Nombre séries / an
	mm	*Nombre*	*% jour/an*	*% jour/an*	*Nombre*
Extrême	≥ 120	1	0,07	0,07	0,09
Rare	95-100	1	0,07	0,14	0,09
	90-95	1	0,07	0,21	0,09
	85-90	1	0,07	0,28	0,09
	80-85	1	0,07	0,36	0,09
	75-80	1	0,07	0,43	0,09
	70-75	2	0,14	0,57	0,18
	65-70	1	0,07	0,64	0,09
	60-65	1	0,07	0,71	0,09
Occasionnel sévère	55-60	5	0,36	1,07	0,45
	50-55	4	0,28	1,35	0,36
	45-50	4	0,28	1,63	0,36
	40-45	10	0,71	2,34	0,91
	35-40	12	0,85	3,20	1,09
Occasionnel modéré	30-35	20	1,42	4,62	1,82
	25-30	25	1,78	6,39	2,27
Courant	20-25	34	2,41	8,81	3,09
	15-20	53	3,76	12,57	4,82
	10-15	97	6,89	19,46	8,82
Fréquent	5-10	164	11,65	31,11	14,91
Négligeable	2-5	168	11,93	43,04	15,27
	0-2	802	56,96	100,00	72,91

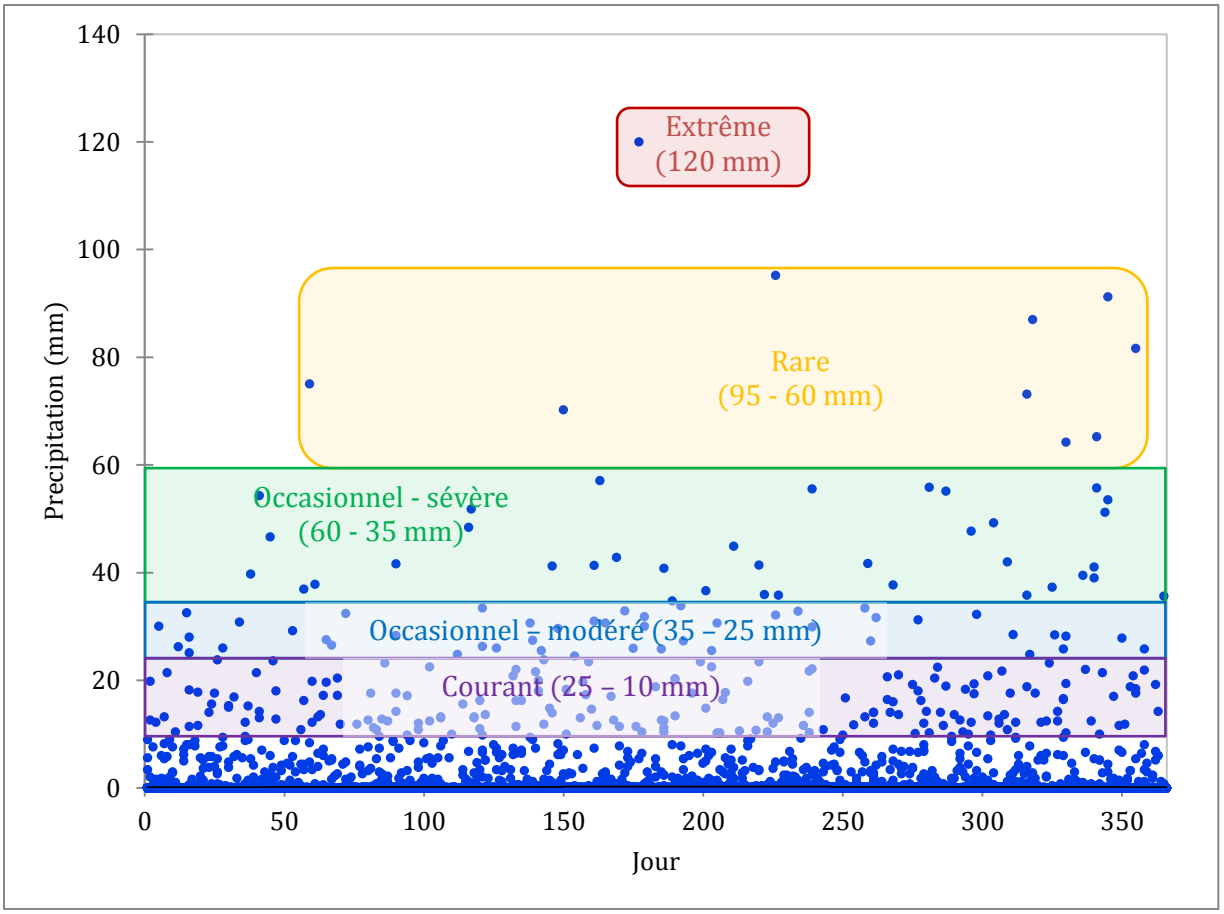


Figure 2.52 – Nuage de points des cumuls de précipitation des séries évènements sur Caen en fonction du jour de l'année (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet)

La représentation des cumuls pluviométriques des séries d'évènements permet de mettre en évidence de nouvelles classifications des évènements. Parmi ces évènements, un se détache en particulier avec un cumul de 120 mm. Il est intéressant de noter ici que l'utilisation des données journalières de 1945 à 2017 avec un cumul glissant sur trois jours donne un cumul maximum de 126 mm soit un ordre de grandeur proche du cumul maximum mis en évidence ici. Cependant là où l'utilisation des données journalières met en évidence dix séries supérieures à 100 mm, une seule est identifiée avec les données datant de 2006. Cela souligne à nouveau l'importance de l'utilisation de longues chroniques de données pour observer les évènements extrêmes (Cantat, 2004a). Cette catégorie dite « extrême » correspond à des séries de pluies qui incluent un évènement pluvieux majeur. Dans le cas de la série de 120 mm, il s'agit de la pluie du 25 juin 2006 (déjà mentionnée précédemment) avec un cumul de 77,6 mm. Il est donc naturel que cette catégorie présente la même saisonnalité que celle des évènements extrêmes, à savoir « été-automne ».

La catégorie dite « rare » se différencie de la précédente puisqu'elle n'inclut pas seulement des séries composées d'un évènement majeur mais qu'elle est en majorité composée de séries qui sont la somme d'évènements de moindre importance (< 25 mm). C'est notamment le cas des deux premières séries de cette catégorie : 95,2 mm tombés entre le 11 et le 14 août 2015 et 91,2 mm tombés entre le 2 et le 11 décembre 2006. Il est significatif d'observer que la majorité de ces séries ont lieu entre novembre et décembre, soit sur des mois qui ne présentent pas d'évènements pluvieux majeurs mais une forte pluviométrie moyenne.

Les catégories dites « occasionnelle – sévère » et « occasionnelle – modérée », présentent une répartition et des occurrences relativement similaires. Elles se distinguent par l'ampleur de leur cumul pluviométrique et donc des conséquences engendrées. À noter que la moyenne de durée de ces séries est comprise entre 4 et 5 jours, soit des durées assez longues. Il s'agit ici en majorité d'une succession de journées pluvieuses comprenant soit un ou deux évènements marquants (de l'ordre de 30 à 20 mm) soit plusieurs évènements de moindre importance.

La catégorie dite « courante » est intéressante puisqu'elle représente 13 % des séries avec un cumul de précipitations qui reste significatif (> 5 mm). Elle peut ainsi être utilisée pour représenter le comportement des structures perméables soumises à des longues successions d'averses ce qui représente un des cas de fonctionnement courant du climat Normand.

En conclusion, l'observation des séries d'évènements donne un regard complémentaire aux deux premières approches. Elle permet de mettre en évidence à la fois des régimes de fonctionnement courant et représentatif du climat local et des régimes de fonctionnement potentiellement très sévères (catégorie dite « rare ») mais qui n'avait pas pu être identifiés comme tel avec la seule étude des évènements ou cumuls journaliers. Cette catégorie de série d'évènements est potentiellement d'autant plus importante à considérer qu'elle présente une saisonnalité plus marquée en hiver, soit à une période où les conditions « bio-pédoclimatiques » sont favorables à la formation rapide de ruissellement (2.4.2.1).

2.4.2.5 SYNTHÈSE DE LA DÉMARCHE ET PROPOSITION DE CLASSIFICATION

La démarche méthodologique mise en place est synthétisée dans le Tableau 2.17. Elle repose sur les trois niveaux d'analyse développés précédemment : les cumuls journaliers, les intensités des évènements et les cumuls des séries d'évènements. Chacune de ces analyses permet de mettre en évidence différentes informations et s'appuie sur des données à un pas de temps adapté à l'usage qui en est fait.

Tableau 2.17 – Méthodologie de classification de la pluviométrie locale

Étape	Valeur étudiée	Données utilisées	Informations retirées
1	Cumul de précipitations journalières	La plus longue chronique possible de précipitations journalières	Seuil des précipitations correspondant à moins d'une occurrence par an (ici 25 mm). Classification des journées de pluies au-dessus de ce seuil. Identification des pluies extrêmes
2	Intensité et durée des évènements	Données pluviométriques au pas de temps horaire ou 6 minutes permettant de dissocier les évènements et de connaitre leur durée.	Classification de la pluviométrie courante (inférieure ou proche du seuil précédent) avec l'identification des intensités les plus récurrentes et des valeurs seuils d'intensités. Analyse de la relation Intensité-Durée des évènements.
3	Cumul de précipitation des séries d'évènements	Données pluviométriques au pas de temps horaire ou 6 minutes permettant de dissocier les évènements et de connaitre leur durée.	Classification des séries d'évènements les plus courantes. Classification des séries d'évènements présentant un cumul de précipitation important (> seuil) notamment celles composées d'une somme d'évènements mineurs.

À partir de cette méthode une classification est proposée pour Caen et ses environs. Elle est construite à partir des données au pas de temps 6 minutes de 2006 à 2017 pour les séries et les évènements inférieurs à 25 mm et à partir des données journalières de 1945 à 2017 pour les évènements supérieurs à 25 mm.

Le tableau Tableau 2.18 présente la synthèse de l'exploration des données réalisée et liste les typologies et les évènements retenus pour la modélisation. À noter que l'occurrence donnée correspond à l'occurrence qu'un évènement appartenant à la typologie survienne.

Pour les trois catégories d'évènements définis à partir de leur intensité (évènements « faibles », « courants », et « occasionnels »), un seuil minimum de précipitation a été fixé à 2 mm, au regard de la discussion développée au point 2.4.2.1, et un seuil maximum à 25 mm, puisque les évènements supérieurs à 25 mm appartiennent à la catégorie dite « sévère ».

Tableau 2.18 - Classifications des précipitations retenues pour définir les typologies de pluviométrie locale sur Caen et ses environs

Typologies	Cumul de pluie	Intensité	Occurrence	Observations
	mm	mm/min	PR[1] ou Nbr/an	
Évènements extrêmes	> 80	/	PR : 25	Orages ou front chaud Été-automne
Évènements majeurs	45 – 60	/	PR : 7	Été-automne
Évènements sévères	25 – 45	/	Nbr : 1 à 2	Mai à octobre
Évènements Occasionnels	2 – 25	0,05 – 0,09	Nbr : 15	
Évènements courants	2 – 25	0,033 – 0,05	Nbr : 20	
Évènements faibles	2 – 25	0,022–0,033	Nbr : 25	
Séries extrêmes	> 110	/	PR : 20	Liée à un évènement majeur. Été-automne
Séries majeures	60 – 95	0,004 – 0,02	PR : 1	
Séries occasionnelles	25 – 60	0,003 – 0,06	Nbr : 7	
Séries courantes	5 – 25	0,001 – 0,08	Nbr : 32	

[1] : PR = période de retour

Pour chaque typologie un à deux évènements historiques sont retenus en veillant à ce qu'ils soient représentatifs de la diversité des évènements de leur catégorie. Ce sont ces évènements qui sont utilisés comme données pluviométriques (hyétogramme) d'entrée pour la modélisation.

Les évènements historiques représentatifs sont présentés dans le Tableau 2.19 qui donne pour chaque typologie le cumul pluviométrique, la durée et l'occurrence des évènements historiques retenus. Ces évènements (sauf ceux correspondant aux séries d'évènements) sont également représentés sur la Figure 2.53 et comparés avec les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) construites à partir des coefficients de MONTANA de la station de Caen-Carpiquet. Cette

estimation permet de donner une estimation de l'occurence propre à chaque évènement et de visualiser le spectre de ratio intensité/durée représenté par les catégories retenues.

Tableau 2.19 – Liste des évènements ou séries d'événements climatiques utilisés pour les différents scénarios de modélisation

Évènements	Pluie (mm)	Durée (heures)	Date historique	Occurrence
Extrême	83,6	3	22/07/2013	PR > 100 ans
	96,6	17	25/06/2006	PR entre 20 et 50 ans
Majeur	48,2	26	13/11/2010	PR < 10 ans
Sévère	31,3	11	13/08/2011	PR < 10 ans
Occasionnel	5,2	1h18	06/07/2008	Nbr ≈ 15 par an
Courant	6,4	2h24	15/01/2008	Nbr ≈ 20 par an
Faible	4,4	2h48	17/11/2014	Nbr ≈ 25 par an
Série extrême	120	45	24-26/06/2006	PR ≈ 20 ans
Série majeure	71,1 95,2	296 (12 j) 91 (4 j)	31/10-12/11/2013 11-14/08/2015	Nbr ≈ 1 par an
Série occasionnelle	34,7	95 (4 j)	04-08/07/2014	Nbr ≈ 7 par an
Série courante	10	41	19-21/10/2016	Nbr ≈ 32 par an

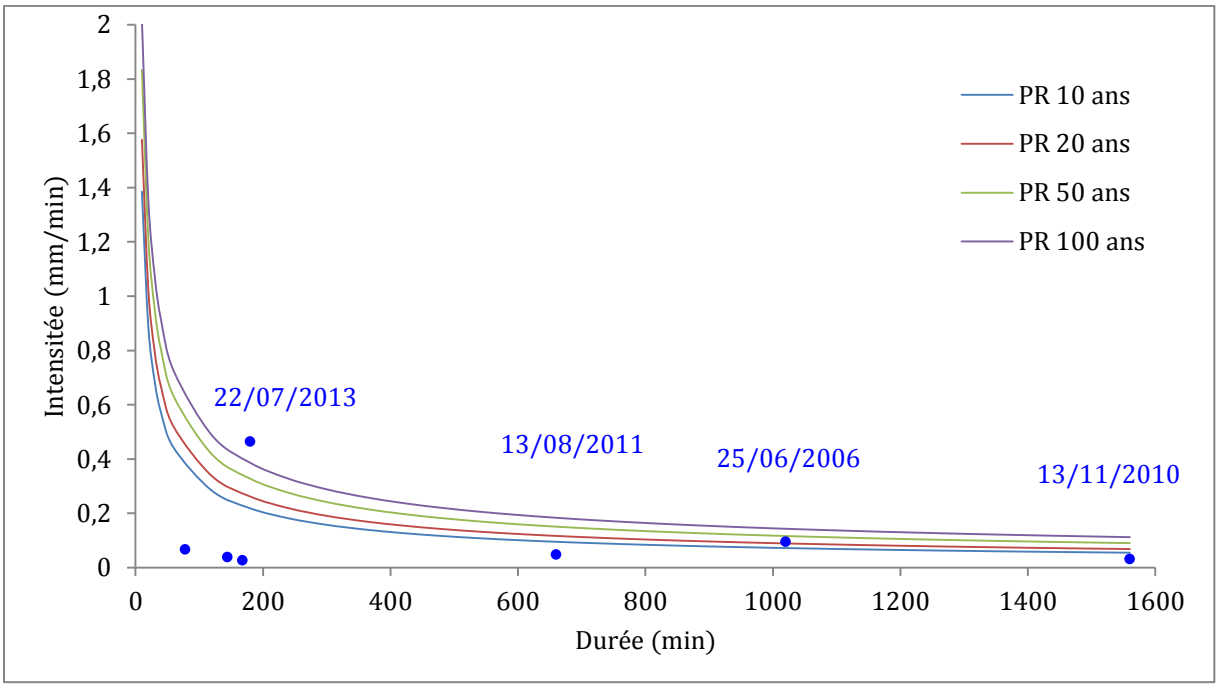


Figure 2.53 - Représentation des évènements retenus sur le diagramme intensité-duré-fréquence (IDF) local (Courbe IDF tracé à partir des coefficients de MONTANA de la station Météo France de Caen-Carpiquet).

Il apparait notamment que les deux évènements extrêmes représentent deux situations très différentes. L'évènement du 22/07/2013 correspond à un orage très intense, il est situé au-dessus de la courbe de période de retour 100 ans. L'évènement du 25/06/2006 est situé entre les courbes de période de retour 20 ans et 50 ans. Les évènements des typologies d'évènements dits « majeurs » et « sévères » sont tous deux situés sur ou sous la courbe de période de retour 10 ans. Les évènements inférieurs à 25 mm de cumul de précipitations se retrouvent logiquement bien en dessous des quatre courbes. Leur durée augmente à mesure que leur intensité décroit.

Toutes les typologies et les évènements utilisés comme données pluviométriques d'entrée sont détaillés dans l'annexe C qui présente pour chaque typologie une fiche type avec une présentation d'ensemble des évènements historiques qui la compose et une présentation du hyétogramme du ou des évènements historiques représentatifs retenus. Seule la fiche correspondant à la typologie d'évènements « extrêmes » est présentée ici, pour donner un exemple, et pour présenter la pluie du 22 juillet 2013 qui est utilisée systématiquement comme donnée pluviométrique d'entrée pour toutes les simulations de référence dans les deux modèles.

Enfin, dans le contexte actuel de changement climatique, ces catégories climatiques seront probablement amenées à évoluer à l'avenir. La méthodologie présentée ici mériterait d'être appliquée aux données DRIAS corrigées sur la période de référence (1950 – 2005) et aux projections sur le 21ème siècle (2006-2100) selon les scénarios RCP 2.5 et 8.5 proposés par le GIEC (GIEC, 2014) pour observer les éventuelles évolutions des catégories présentées ici.

2.4.2.6 PRÉSENTATION DE LA TYPOLOGIE « ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES »

Définition : évènements avec un cumul de précipitations supérieur à 80 mm.
Occurrence : période de retour de 25 ans ou supérieure.
Saisonnalité : été et automne.

Les évènements historiques qui composent cette typologie de pluviométrie sont présentés sur la Figure 2.54.

À noter que l'évènement du 22/07/2013 ne figure pas dans les données de la station Météo France de Caen-Carpiquet. En effet, la station Météo France de Caen-Carpiquet a enregistré ce jour-là un cumul de précipitation de 20,7 mm alors qu'une station privée située en centre-ville de Caen (à moins de 4 km de la station Météo France) a enregistré un cumul de précipitation de 83,6 mm.

Cet évènement extrême a provoqué de fortes inondations du centre-ville de Caen (Beauchamp, 2014). Il sert d'évènement référence pour les orages violents dans le cadre de ce travail.

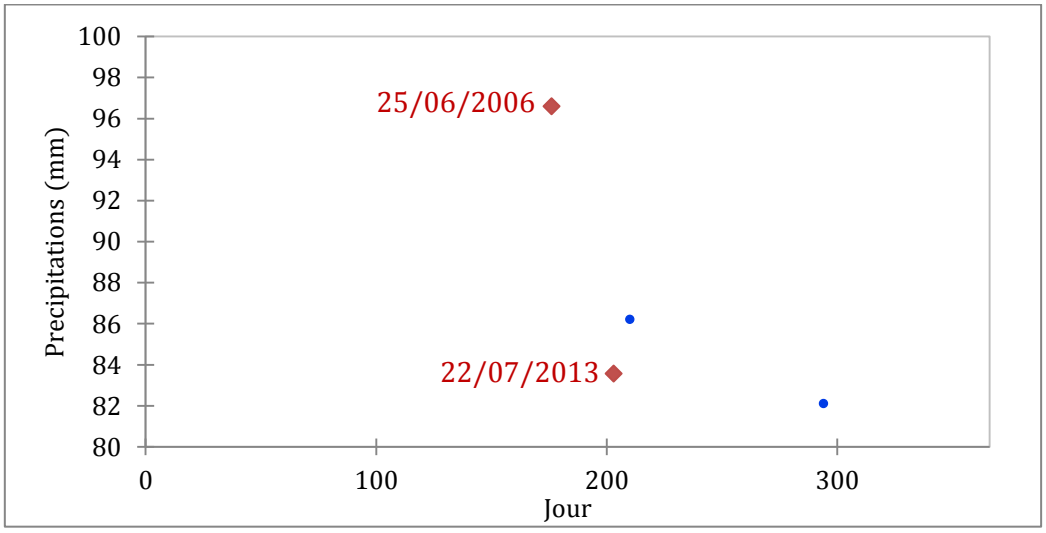


Figure 2.54 - Nuage de points de la typologie "évènements extrêmes". Représentation des évènements retenus en rouge.

Les figures 2.55 et 2.56 présentent le hyétogramme de pluie des deux évènements retenus. L'évènement du 25/06/2006 correspond à la stagnation d'un front chaud pendant près d'une

journée et a entrainé un cumul de précipitation de 96,6 mm en 17 heures. L'évènement du 22/07/2013, mentionné précédemment, correspond à un orage très localisé avec un cumul de précipitation de 83,6 mm en 3 heures.

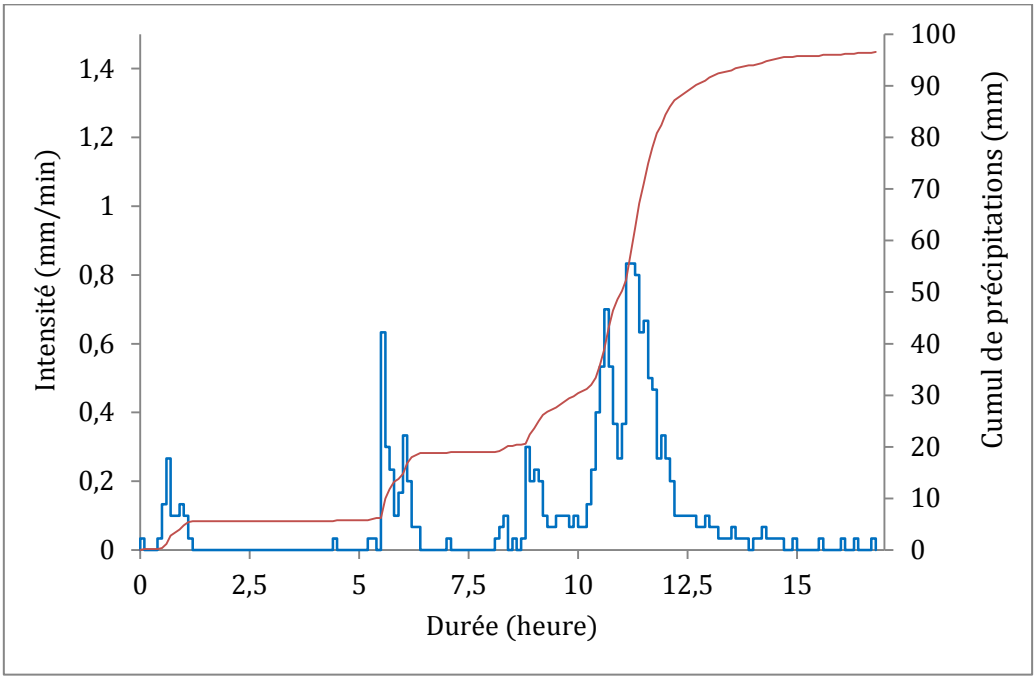


Figure 2.55 – Hyétogramme de l'évènement du 25/06/2006, représentatif de la typologie dite « extrême »

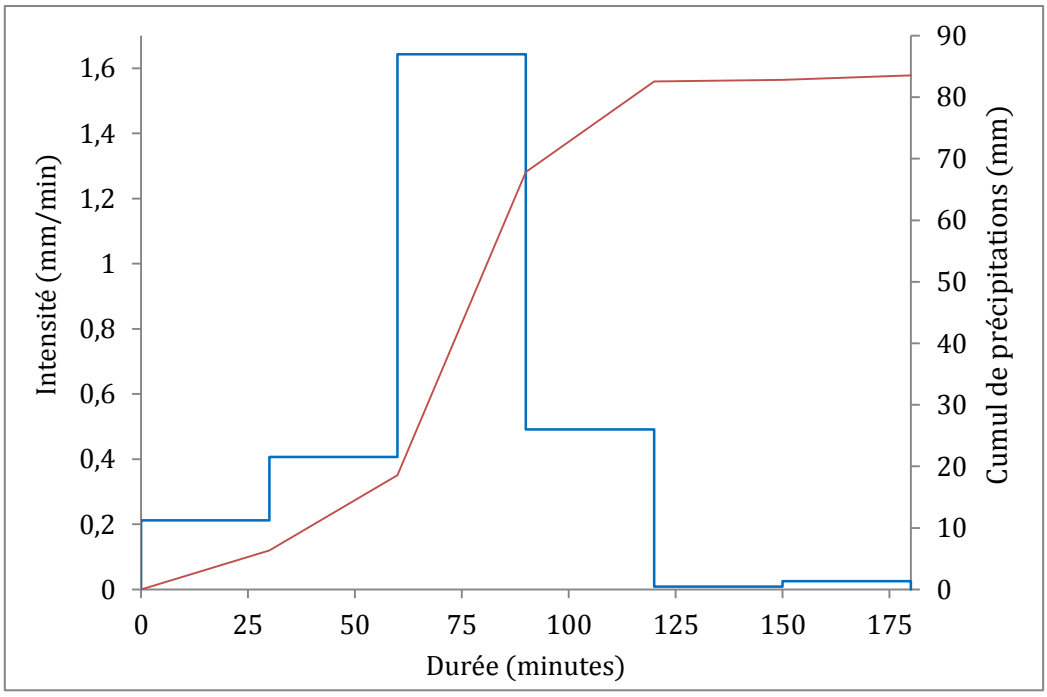


Figure 2.56 - Hyétogramme de l'évènement du 22/07/2013, représentatif de la typologie dite « extrême » et utilisé comme donnée pluviométrique de référence pour l'ensemble des simulations des modèles *PermetAble* et *PorousCity*.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre présente les données nécessaires au travail de modélisation à l'échelle de la structure et du bassin versant, développé dans les chapitres 3 et 4. Ces données s'organisent entre :

- des données de description des propriétés de l'objet modélisé (structure perméable, 2.1, et bassin versant, 2.3), utilisées pour décrire la structure et le bassin versant dans les différents modèles ;
- des mesures ou observations du fonctionnement hydrologique de l'objet modélisé (essais en laboratoire, 2.2, ou observation de terrain, 2.3.2.3), utilisées pour caler et/ou valider les deux modèles ;
- et des données pluviométriques (2.4), utilisées en entrée des deux modèles pour reproduire différents scénarios climatiques.

Pour ces différents types de données, un compromis a systématiquement été cherché entre la pertinence des données et le temps nécessaire à leur collecte. Ainsi, les informations collectées s'appuient sur des données issues de la littérature scientifique ou de plateformes de données publiques, et également sur des données produites par des mesures ou observations de terrain ou en laboratoire. Le travail de production de données est motivé, soit pour produire une donnée qui n'existe pas par ailleurs (comme pour la description des propriétés des matériaux de la structure par exemple), soit pour préciser une donnée déjà existante pour en vérifier la validité et explorer l'influence de la précision de la donnée sur la modélisation (donnée topographique et d'occupation du sol sur l'avenue de Verdun par exemple).

La description des propriétés des matériaux de la structure a fait l'objet d'une attention particulière. Ces données alimentent le modèle *PermetAble*, modèle à base physique, dont les résultats sont très étroitement liés à la qualité des descriptions des matériaux modélisés. Les matériaux étant décrits par des propriétés mesurables physiquement, ils ne font pas l'objet d'un processus de calage par la suite. Le jeu de données expérimental dit « de calage » est notamment utilisé dans le chapitre 3 pour caler un paramètre supplémentaire, la perméabilité minimum K_{min}, nécessaire à la modélisation, mais non mesurable physiquement. Les données des quatre essais dit de « vérification » servent ensuite à valider les résultats du modèle. Ils permettent ainsi de confirmer (ou de nuancer) la justesse des données de descriptions des propriétés de la structure présentées ici.

L'ensemble de ces données a été produit dans un contexte précis, lié au cadre de la thèse. Ainsi, les matériaux décrits correspondent à ceux utilisés pour la réalisation du banc d'essais, le bassin versant décrit correspond à un quartier de la commune de Ouistreham et les évènements pluviométriques décrits correspondent aux différentes typologies de précipitations observées sur les villes de Caen et Ouistreham. Les résultats de l'exploration des deux modèles présentés par la suite sont donc spécifiques au contexte décrit. Les modèles en revanche peuvent être réutilisés avec d'autres jeux de données pour décrire un contexte différent.

Enfin, le travail de collecte de ces différentes données a permis de mettre en évidence des points d'attention en vue de la modélisation. Le Tableau 2.20 synthétise ces observations et indique les sections du manuscrit où le lecteur pourra trouver les résultats de l'exploration des modèles correspondants.

Tableau 2.20 – Synthèse des données présentant des spécificités ou des points d'attention particuliers à explorer par la modélisation.

Donnée / Observation	Présentation de la donnée	Modèle	Questions / spécificités à explorer par la modélisation	Présentation des résultats
Paramètres de VAN GENUCHTEN	2.1.2.3	*PermetAble*	▪ Influences de l'ajustement des paramètres de VG sur les processus hydrologiques dans la structure. ▪ Comportement de l'eau dans la couche de fondation qui présente une CRE avec une plage de transition sec-humide très courte.	3.2.2.5
Valeur d'interception	2.1.3.3	*PorousCity*	▪ Tester l'influence de la valeur d'interception sur les résultats du modèle.	4.2.3.1
Mise en évidence d'un stockage par rétention dans la structure	2.2.3	*PermetAble*	▪ Étudier le stockage de l'eau et les paramètres qui l'influencent. ▪ Détailler les mécanismes de stockage de l'eau par rétention.	3.2.1.3 et 3.3.1.3
Mise en évidence de décalages temporels entre les différents processus	2.2.3	*PermetAble*	▪ Étudier le rôle de temporisation de la structure et les paramètres qui influencent le plus les décalages temporels entre les différents processus.	3.3.2.2
Occupation du sol	2.3.2.2	*PorousCity*	▪ Quelle est l'influence de la finesse de description de l'occupation du sol sur les résultats de la modélisation.	4.2.3.4

CHAPITRE 3

3 MODÉLISATION À L'ÉCHELLE DE LA STRUCTURE

INTRODUCTION DU CHAPITRE

Ce chapitre présente le travail de modélisation à l'échelle de la structure. Cette étape vise à apporter des éléments de compréhension sur le comportement hydrologique des structures perméables et à quantifier leurs performances dans différentes conditions d'utilisation. Ces résultats doivent permettre ensuite de construire une représentation synthétique du fonctionnement de ces structures qui sera ensuite utilisée pour la modélisation à l'échelle du bassin versant. Pour répondre à ces objectifs un modèle à base physique a été développé et exploité. La première section de ce chapitre présente la construction de ce modèle. La section 3.2 présente ensuite les étapes de calage et de vérification du modèle *PermetAble*. Enfin, la section 3.3 développe la phase d'exploration du modèle.

Dans l'ensemble de ce chapitre la structure modélisée est représentée dans le modèle selon la géométrie précisée au chapitre 2 et représentée sur la Figure 3.1.

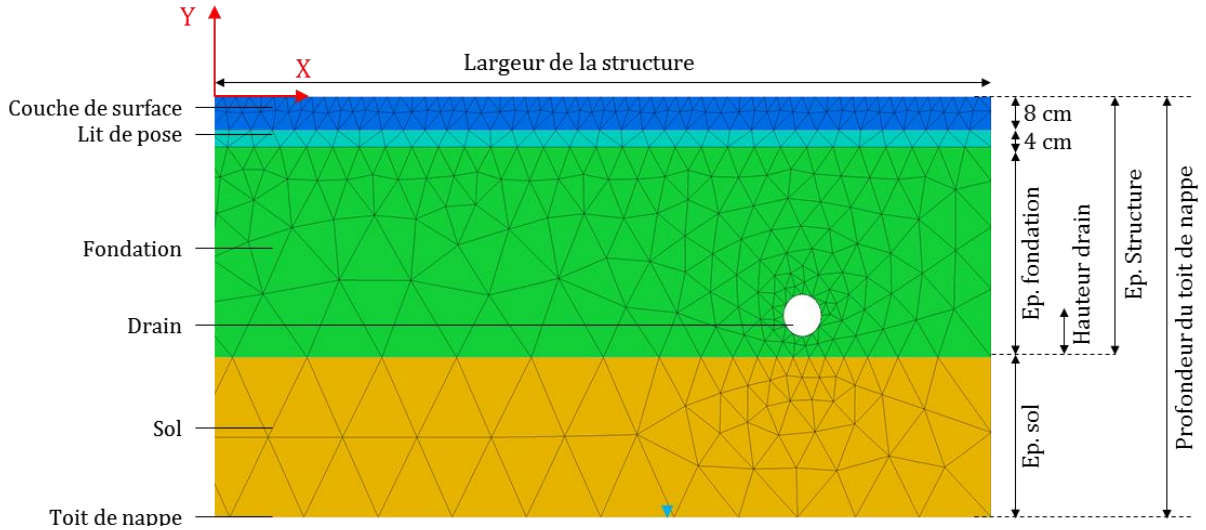


Figure 3.1 – Schéma de la représentation des structures perméables dans le modèle *PermetAble*.

Section 3.1 – Présentation et construction du modèle *PermetAble*. Cette section commence par la présentation de la démarche globale de modélisation, en partant de la formulation du problème physique, traduit en un modèle mathématique puis en un modèle numérique. La formulation du modèle numérique repose sur l'utilisation de la méthode dite des éléments finis, elle est codée dans le logiciel FlexPDE qui assure la résolution numérique du modèle. Une fois la structure d'ensemble du code présentée, cette section détaille chacun des paramètres utilisés en présentant leur rôle dans le modèle et les hypothèses prises. Ces paramètres permettent notamment de décrire les conditions aux limites indispensables pour la résolution du modèle. Enfin les indicateurs utilisés pour exprimer les résultats des simulations sont développés.

Section 3.2 – Calage et vérification du modèle *PermetAble*. Ces deux étapes reposent sur l'utilisation de données expérimentales obtenues en laboratoire à l'aide d'un banc d'essai

(Section 2.2). Ce modèle à la particularité d'être construit avec un maximum de paramètres dont les valeurs sont estimées « physiquement », c'est-à-dire dont la valeur a un sens physique et peut être déterminée expérimentalement ou dans la littérature. Ainsi l'étape de calage expérimental se focalise principalement sur l'estimation de la valeur de la perméabilité minimum pour les différents matériaux de la structure. L'étape de vérification permet ensuite de confirmer la validité du modèle en confrontant ces résultats à quatre jeux de données différents.

Section 3.3 – Exploration du modèle *PermetAble*. Cette section commence par la présentation des résultats d'une analyse de sensibilité conduite sur l'ensemble des paramètres du modèle. Les résultats obtenus permettent d'explorer l'influence de chaque paramètre du modèle sur les processus hydrologiques. La recherche d'explications des effets observés permet d'approfondir la compréhension de l'écoulement de l'eau dans la structure et d'identifier les facteurs qui l'influencent le plus. Ces résultats sont ensuite exploités pour construire différents scénarios utilisant des structures à revêtements perméables. Les résultats de ces scénarios apportent des éléments de réponse à l'objectif de départ : quantifier les performances de ces structures dans différentes conditions d'utilisation.

Section 3.4 – Conclusion du chapitre 3 et discussions. En conclusion de ce chapitre l'ensemble des résultats obtenus est mis en perspective et une synthèse est proposée pour schématiser le fonctionnement et les performances des structures à revêtements perméables. Les limites du modèle *PermetAble* sont ensuite discutées.

SECTION 3.1

3.1 PRÉSENTATION ET CONSTRUCTION DU MODÈLE PERMEABLE

3.1.1 MODÉLISATION PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS AVEC FLEXPDE

Le modèle *PermetAble* est un code développé pour être lu et exécuté par le logiciel FlexPDE. Ce logiciel permet de résoudre des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis. Cette sous-section présente dans un premier temps la démarche de la modélisation par éléments finis en l'appliquant à la modélisation des écoulements en milieux poreux. Ensuite, elle introduit le logiciel FlexPDE, sa structure, et les possibilités qu'il offre à l'utilisateur. Enfin, la structure du code développée avec FlexPDE est présentée dans son ensemble à la fin de cette sous-section, elle sera détaillée ensuite dans les sous-sections suivantes.

3.1.1.1 MODÉLISER LES ÉCOULEMENTS EN MILIEUX POREUX AVEC LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

La modélisation d'un problème physique ne se résume pas à l'utilisation de la méthode des éléments finis qui n'est qu'une des étapes de la démarche de modélisation qui est représentée par la Figure 3.2 (Oudin, 2008). Ce schéma met en évidence le fait que la réponse obtenue n'est pas une réponse exacte au problème posé, mais le résultat d'un modèle numérique qui vise à donner une représentation d'un problème physique et repose sur différents niveaux d'hypothèses.

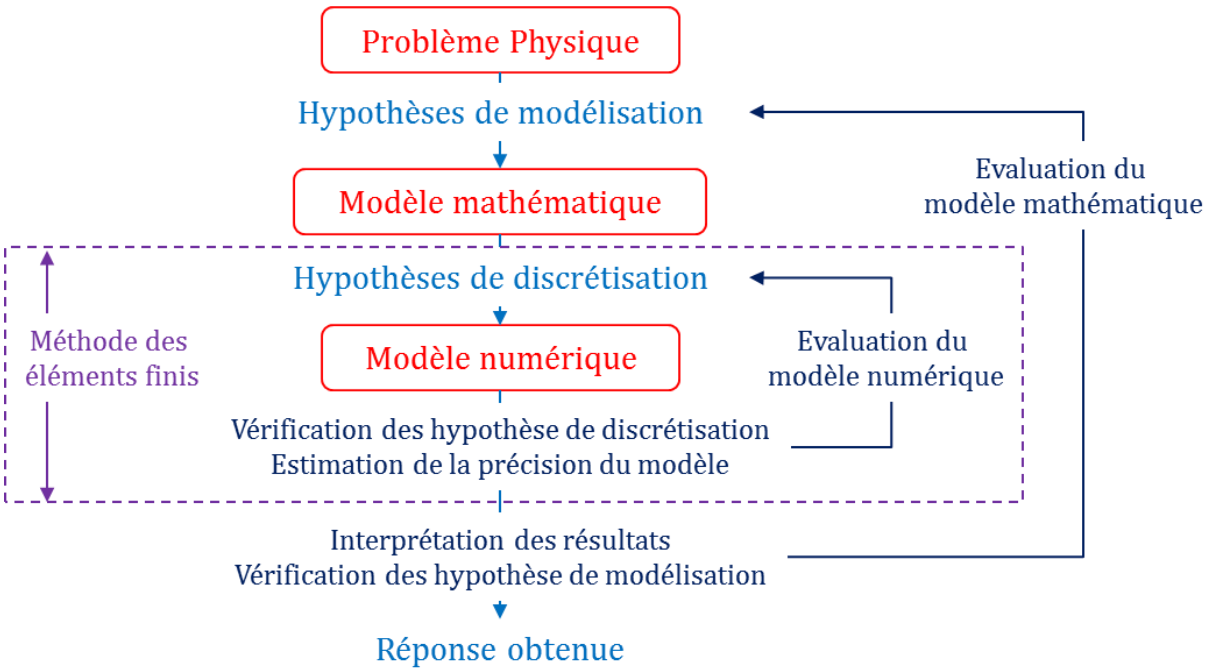


Figure 3.2 – Schéma de la démarche de modélisation par éléments finis des écoulements en milieu poreux – D'après un cours de Hervé OUDIN (Oudin, 2008).

Le point de départ de la démarche de modélisation est un problème physique, dans le cas présent, l'écoulement de l'eau dans une structure perméable. Il convient ensuite de définir des hypothèses simplificatrices afin de passer du problème physique à un modèle mathématique.

Les hypothèses de modélisation clefs pour le développement du modèle *PermetAble* sont synthétisées ci-dessous (3.1.1.1.a). Cette première étape est détaillée dans l'annexe A qui présente l'ensemble des notions et théories scientifiques nécessaires à la formulation mathématique du problème physique étudié. Une fois le problème mathématique formulé, si celui-ci n'admet pas de solution analytique, ce qui est le cas pour les écoulements en milieux poreux, il faut poser des hypothèses de discrétisation pour passer d'un modèle mathématique défini sur un milieu continu (équation aux dérivés partielles) à un modèle discret (équation matricielle). Cette discrétisation permet d'obtenir un modèle numérique qu'il sera possible de résoudre par la méthode choisie, ici la méthode des éléments finis (3.1.1.1.b). Pour s'assurer de la pertinence des résultats obtenus, les hypothèses de discrétisation posées doivent être vérifiées, ainsi que la précision du modèle numérique.

a. Passer d'un problème physique à un modèle mathématique

Le problème physique (écoulement de l'eau en milieu poreux) est écrit sous la forme d'un modèle mathématique à l'aide de l'équation de RICHARDS (Dakhlaoui, 1996).

Équation 3.1 - Équation de RICHARDS

$$div\left(K(h) \times \overrightarrow{grad}(h+z)\right) = \frac{\partial\theta(h)}{\partial h} \times \frac{\partial h}{\partial t}$$

Cette équation se présente justement sous la forme d'une équation aux dérivées partielles (EDP) qui établit une égalité entre d'un côté le bilan des flux d'eau entrant et sortant d'un volume élémentaire, de l'autre côté la variation d'eau stockée dans ce volume.

La détermination des flux entrant et sortant repose sur une généralisation de la loi de DARCY aux milieux non saturés, ce qui nécessite d'établir un lien entre la perméabilité K et la pression interstitielle h (relation $K(h) = \mathrm{f}(h)$). La quantité d'eau contenue dans le volume élémentaire étudié est déterminée par sa teneur en eau θ qui elle-même est fonction de la pression interstitielle h (relation $\theta(h) = \mathrm{f}(h)$). Cette dernière relation est appelée la courbe de rétention d'eau. Différents modèles mathématiques existent pour représenter les relations physiques entre ces variables. Dans le cadre de ce travail les lois de VAN GENUCHTEN-MUSALEM sont utilisées (Van Genuchten, 1980).

Équation 3.2 – $\theta(h)$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{1}{1+(\alpha \cdot h)^n}\right)^m$$

Équation 3.3 – $K(h)$

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{1/2} \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^{1/m}\right)^m\right]^2$$

L'utilisation de ces équations dans cette forme s'accompagne de plusieurs hypothèses de modélisation (Tableau 3.1). Ces hypothèses devront être vérifiées lors de la phase d'étude et d'interprétation des résultats. Dans le cadre de ce travail, l'hypothèse des faibles vitesses qui permet de négliger l'énergie cinétique nécessite notamment une attention particulière.

Tableau 3.1 – Hypothèses de modélisation du modèle *PermetAble* et leur déclinaison mathématique dans le modèle.

Hypothèse	Commentaire	Modèle mathématique
L'écoulement réel de l'eau à l'intérieur de la structure est représenté par une vitesse de filtration moyenne $\vec{q}$	Cette vitesse de filtration est une vitesse moyenne d'écoulement et n'a pas de réalité physique. Le modèle ne permet donc pas d'étudier l'écoulement des particules d'eau mais un flux moyen qui traverse un milieu poreux	Possibilité d'utiliser la loi de DARCY et sa généralisation, la loi de RICHARDS
Les matériaux étudiés sont homogènes et isotropes	Pas d'écoulement préférentiel ni de variation de perméabilité au sein d'un même matériau	$K(h)$ est indépendant de la direction (x, y, z) et homogène pour un matériau
Les écoulements ont lieu à une vitesse relativement faible, aussi l'énergie cinétique est négligée	Le domaine de validité se limite aux écoulements laminaires, soit pour des milieux poreux, à des écoulements de REYNOLDS Re [-] inférieur à 1. [12]	Les flux d'eau sont gouvernés par l'altitude z, et la pression interstitielle h $\vec{Q} = -K(h) \cdot \overrightarrow{grad}(h + z)$ La résolution du problème se limite donc à déterminer une seule variable : h
Les variables $\theta(h)$ et $K(h)$ sont représentées par les lois de VAN GENUCHTEN-MUALEM sans prendre en compte de phénomène d'hystérésis	Cette hypothèse permet de simplifier la représentation mathématique des relations $K(h) = f(h)$ et $\theta(h) = f(h)$. Elle n'est vraie que dans le domaine de validité des lois en question	Permet d'utiliser les lois de VAN GENUCHTEN-MUALEM
La matrice solide qui compose le milieu poreux est indéformable	La porosité ouverte, qui permet la circulation et le stockage de l'eau, ne varie donc pas	La variation d'eau stockée dans un volume élémentaire est uniquement due à la variation de la teneur en eau Le volume élémentaire ne se déforme pas

b. Passer d'un modèle mathématique à un modèle numérique

Si le modèle mathématique obtenu (ici l'Équation 3.1, complétée par l'Équation 3.2 et l'Équation 3.3) ne peut pas être résolu analytiquement, une autre méthode mathématique doit être utilisée pour le résoudre. C'est ici qu'intervient la méthode des éléments finis. Elle permet de donner une estimation de la variable h du modèle mathématique (Équation 3.1) pour chaque élément d'un maillage obtenu par discrétisation de la structure étudiée. La résolution numérique consiste à linéariser l'EDP sur chaque élément du maillage et à résoudre dans une matrice globale chaque système d'équation linéaire. L'utilisation de cette méthode implique donc une discrétisation de la géométrie étudiée. La finesse de la discrétisation influence directement la juste représentation de la géométrie (un cercle, géométrie continue, est discrétisé en segments de droite, géométrie discrète) et de la solution obtenue en chaque nœud du maillage. Si la discrétisation utilisée ne permet pas à la solution de converger ou conduit à une erreur d'estimation trop importante il faut affiner le maillage utilisé. Ces étapes de discrétisation, de résolution et d'estimation de l'erreur commise sont assurées par le logiciel FlexPDE (3.1.1.2).

La résolution numérique nécessite également des données aux frontières du domaine étudié, appelées conditions aux limites. Ces conditions peuvent porter sur la valeur de la variable

[12] Ce qui est généralement le cas avec des conductivités hydrauliques de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-8} m/s (Soutter et al., 2007). Cela oblige à porter une attention toute particulière pour les matériaux où les débits sont élevés (sols graveleux ou karstiques, graviers et gravillons, et béton drainant).

étudiée, condition dite de DIRICHLET (une valeur de pression ici) et/ou sur une valeur de flux, condition dite de NEUMANN (un débit entrant ou sortant par exemple). La définition des conditions aux limites est une étape importante du développement du modèle. Les conditions aux limites utilisées sont présentées dans la sous-section 3.1.2.

3.1.1.2 LE LOGICIEL DE TRAITEMENT : FLEXPDE

Le logiciel FlexPDE est développé et commercialisé par la société PDE Solution (PDE Solutions Inc., 2017). Ce logiciel est un solveur numérique dédié exclusivement à la résolution des EDP par la méthode des éléments finis. Contrairement à un logiciel dédié à un usage spécifique, ou à d'autres codes de résolution numérique, FlexPDE ne possède aucune bibliothèque de problèmes prédéfinis. C'est à l'utilisateur de définir et de coder le modèle mathématique qu'il souhaite résoudre (étape (a) passer d'un problème physique à un modèle mathématique). En revanche, FlexPDE comprend l'ensemble des fonctions et des modules nécessaires à la résolution du modèle mathématique codé. C'est donc le logiciel qui s'occupe du passage du modèle mathématique au modèle numérique (étape (b)) avec la possibilité pour l'utilisateur de préciser la méthode de discrétisation et/ou la précision souhaitée.

Fonctions et modules présents dans le logiciel FlexPDE (PDE Solutions Inc., 2017; Pooneh Maghoul, 2012) :

- un éditeur de script qui permet à l'utilisateur de coder le modèle mathématique et de décrire et visualiser la géométrie du domaine à modéliser. Il n'y a pas de limite dans la géométrie, qui peut être complexe et comporter de nombreuses régions avec des propriétés différentes, ni dans le modèle mathématique qui peut associer autant d'EDP que souhaité (la seule limite étant les ressources de la machine utilisée) ;
- un générateur de maillage adaptatif en temps qui discrétise la dimension temporelle à l'aide d'un pas de temps de calcul ajusté à partir de celui imposé par l'utilisateur pour obtenir la limite d'erreur permise ;
- un générateur de maillage automatique et adaptatif (redéfini à chaque itération) qui discrétise la géométrie décrite avec des éléments finis triangulaires (Figure 3.3). La taille du maillage est ajustée automatiquement par FlexPDE à partir de la limite d'erreur permise par l'utilisateur afin d'optimiser le temps de calcul et la précision obtenue. Elle peut également être imposée par l'utilisateur sur tout ou sur une partie du domaine ;

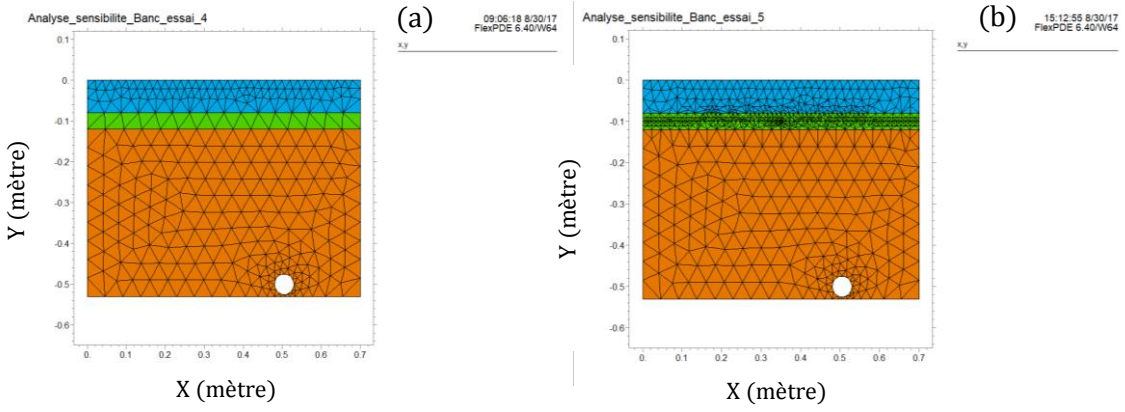


Figure 3.3 – Sortie du modèle *PermetAble*. Maillage de la géométrie modélisée à deux moments différents de la simulation. (a) Au début de la simulation (b) pendant la pluie, quand le front d'infiltration est situé dans le lit de pose.

- un module d'analyse numérique par éléments finis qui sélectionne automatiquement le schéma numérique approprié pour résoudre le modèle mathématique. Il permet de résoudre des problèmes permanents, transitoires, ou aux valeurs propres et dispose d'algorithmes de résolution adaptés pour les équations linéaires ou non-linéaires (la résolution s'effectue alors en utilisant la méthode itérative modifiée de type NEWTON-RAPHSON). La méthode d'éléments finis utilisée peut être choisie quadratique ou cubique ;
- un module d'estimation d'erreurs qui donne pour chaque élément du domaine la précision du résultat et l'adéquation du maillage. C'est ce module qui permet, si l'erreur dépasse la limite définie, d'affiner le maillage de façon itérative jusqu'à ce que l'erreur entre dans la plage admise ;
- un module de sortie graphique qui permet de visualiser les sorties demandées par l'utilisateur (variables élémentaires ou fonctions de variables). L'utilisateur peut définir dans le script autant de sorties qu'il le souhaite sous forme de contours, surfaces, vecteurs, coupes, ou encore suivi de l'évolution d'un paramètre dans le temps. Ces résultats peuvent être exportés manuellement ou automatiquement sous différents formats (texte, tableaux, CDF, tecplot, images, etc.)

Les intérêts du logiciel sont nombreux. Le principal étant qu'il permet de définir de façon simple et dans un seul code la géométrie du domaine, la formalisation mathématique du problème et les sorties souhaitées, et qu'il interprète ensuite ce code en une formalisation de type éléments finis puis matricielle, le résout et permet la visualisation et l'exportation des sorties. Le maillage automatique et adaptatif de la géométrie et du temps est également très précieux. Il permet de représenter finement les détails de la géométrie (le drain par exemple) et les périodes de transitions (début de la pluie par exemple) sans alourdir inutilement la résolution numérique. Différentes autres fonctions et possibilités offertes par ce logiciel ont également été exploitées au cours des simulations, comme celle d'exporter et d'importer l'ensemble des valeurs d'une simulation à un instant *t*.

Plusieurs versions de ce logiciel ont été éditées, avec des améliorations et des mises à jour successives. La version utilisée dans le cadre de ce travail est la version 6.40, avec une licence professionnelle 3D. À noter qu'une version étudiante gratuite existe, elle ne change en rien les possibilités ou les performances du logiciel mais impose une limite maximum sur le nombre de nœuds du maillage.

3.1.1.3 STRUCTURE DU CODE *PERMETABLE* DANS FLEXPDE

Le logiciel FlexPDE impose la structure du script qui permet de coder le modèle souhaité. Ce dernier est organisé en dix parties distinctes, de tailles très diverses. Elles sont présentées ci-dessous avec une synthèse du contenu du modèle *PermetAble*. L'ensemble du code du modèle *PermetAble* tel qu'il est rédigé dans le logiciel FlexPDE est présenté en annexe E.

a. SELECT

Partie où l'utilisateur peut modifier les paramètres par défaut du logiciel FlexPDE. Ces paramètres concernent, par exemple, les procédures d'exportation ou la définition de l'erreur limite admise pour la résolution numérique. Dans le modèle, trois commandes sont notamment utilisées : une pour fixer l'erreur limite admise (ERRLIM) et deux pour définir des préférences d'affichage et d'exportation (PENWIDTH et PRINTMERGE). Ici le fait d'imposer une erreur limite

demandée à $1 \cdot 10^{-3}$ revient à accepter une erreur de l'ordre de 1 mm_{H2O} dans la résolution de la valeur de *h* (les unités utilisées sont celles du SI : mètres, secondes).

```
SELECT {Part where user controls over the default behavior of FlexPDE}
    ERRLIM = 1E-3   {default: 0.002 - This is the primary accuracy control. Both the spatial error control
    XERRLIM the temporal error control TERRLIM are set to this value unless over-ridden by explicit
    declaration. This selector can be STAGED.}
```

b. COORDINATES

Cette partie permet de définir le repère d'espace du modèle. Ce dernier peut être cartésien, cylindrique ou sphérique et en 1D, 2D ou 3D. Dans le modèle *PermetAble,* un repère cartésien 2D (*X*, *Y*) est utilisé. *X* correspond à la variable horizontale et *Y* correspond à la variable verticale. L'origine est située dans le coin en haut à gauche, soit à l'extrémité gauche de la surface de la structure modélisée. Les axes sont orientés positivement vers la droite (*X*) et le haut (*Y*).

c. VARIABLES

Dans cette partie, toutes les variables du système d'EDP à résoudre doivent être listées. Dans le modèle utilisé, cette liste se résume à *h,* la pression interstitielle (notée h_w dans le code pour la différencier de la charge hydraulique notée H).

d. DEFINITIONS

Partie où sont définis tous les paramètres, leurs relations entre eux et les différentes équations ou fonctions utilisées par le modèle. Dans le modèle *PermetAble,* cette partie développe notamment les éléments listés ci-dessous et développés à la sous-section 3.1.2 :

- définition et/ou importation des paramètres concernant la géométrie de la structure, du sol et des surfaces contributrices, les propriétés des matériaux (béton, gravillon, gravier et sol) et les données climatiques (pluie, évaporation) ;
- définition des lois et équations qui décrivent le comportement hydrologique (Loi de VAN GENUCHTEN, calcul des coefficients de ruissellement, etc.) ;
- définition des pas de temps des résultats souhaités (avant et après la pluie) ;
- définition de la position des coupes à réaliser et des indicateurs de sortie (débits et volumes entrant et sortant, stockage et hauteur d'eau dans la structure).

e. INITIAL VALUES

Dans le cas d'un problème dépendant du temps, partie où est précisée la valeur initiale de chacune des variables. Dans le cadre de ce travail, la valeur initiale de *h_w* est définie en considérant que le profil hydrogéologique du sol et de la structure est à l'équilibre à partir de la surface libre (ou toit de nappe)[13]. Autrement dit, $h = 0$ au niveau du toit de nappe (limite basse du domaine de résolution) et décroît (la succion augmente) avec l'altitude selon l'Équation 3.4, développée plus en détails dans l'annexe A.

[13] Ce profil est valable pour décrire la pression intersticielle dans le sol mais elle n'est probablement pas valable pour décrire la pression intersticielle dans la structure perméable et notamment dans la couche de graviers.

Équation 3.4 – Condition initiale sur h

$$h(M) = -[y(M) - y(toit\ de\ nappe)]$$

Avec *y(M)* l'altitude du point M considéré et *y(toit de nappe)* l'altitude du toit de nappe.

Dans le modèle, compte tenu des axes et de l'origine utilisée, cette expression est définie à partir de *Y* et de la profondeur du toit de nappe appelée *Water_table.*

```
INITIAL VALUES {Part where the starting values for nonlinear or time dependent problems are setup}
h_w = -Water_table - Y
```

f. EQUATIONS

Partie où est rédigée chacune des EDP à résoudre, l'équation de RICHARDS (Équation 3.1) dans le cas présent.

```
EQUATIONS {Part where each dependent variable is associated with a partial differential equation}
DIV(-K_w * GRAD(h_w+y)) + m_w * dt(h_w) = 0
```

g. BOUNDARIES

Partie où est décrite la géométrie du domaine en précisant la géométrie et les propriétés de chaque région distincte. La géométrie est décrite en « traçant » le tour du domaine ou de chaque région. Pour chaque frontière extérieure, les conditions aux limites sont précisées à l'aide de deux opérateurs : NATURAL(x) pour imposer une condition de flux (condition de NEUMANN) sur la variable 'x' et VALUE (x) pour imposer une valeur (condition de DIRICHLET) à la variable 'x'.

Dans le modèle *PermetAble*, la géométrie de la structure est décrite telle que présentée à la section 2.1. Les régions définies correspondent aux différents matériaux (béton, gravillon, gravier, sol). Le drain est décrit par extrusion, l'intérieur du drain n'appartient donc pas au domaine de résolution. Les conditions aux limites sont décrites pour chaque frontière extérieure : la surface de la structure (divisée en trois zones, ruissellement de droite, centre et ruissellement de gauche), les parois latérales, le bas du domaine (correspondant au toit de nappe dans le sol) et le contour du drain.

h. TIME

Dans le cas d'un problème dépendant du temps, cette partie précise la valeur de *t* de départ (*Time_Start*) et de fin de la simulation (*Time_End*). Ces deux paramètres sont exprimés en secondes et définis dans la partie DEFINITIONS.

Dans le modèle *PermetAble, Time_Start* vaut toujours 0, et *Time_End* est calculé comme la somme de la durée d'initialisation (fixée à 1 heure de façon arbitraire), plus la durée de l'événement pluvieux, plus un temps de drainage après la fin de la pluie (fixé à 12 heures).

i. MONITORS

Cette partie permet à l'utilisateur de définir des sorties (paramètres ou variables) à suivre à chaque pas de résolution.

j. PLOTS

Partie où l'utilisateur définit l'ensemble des sorties qu'il souhaite et le format sous lequel les afficher et/ou les exporter. Pour cela FlexPDE reconnaît plusieurs commandes qui correspondent à un type d'affichage graphique différent. Chacune de ces commandes peut être précisée par l'utilisateur (zoom, personnalisation du rendu graphique, etc.). Pour chaque sortie l'utilisateur peut demander une exportation automatique au format de son choix :

- CONTOUR (x) : trace un aperçu en 2D de la variable x sur l'ensemble du domaine demandé. Actualisé à chaque pas de temps ;
- ELEVATION (x) chemin : trace une coupe de la valeur de x sur le chemin demandé. Actualisé à chaque pas de temps ;
- HISTORY (x) : trace l'évolution de la valeur x en fonction du temps. Si x est une variable définie sur l'ensemble du domaine il faut préciser en quel point sa valeur doit être prise ;
- SUMMARY (…) : renvoie une page de texte contenant toutes les informations (valeurs de variables par exemple) demandées ;
- SURFACE (x) : trace une élévation en 3D de la variable x sur un domaine en 2D. Actualisée à chaque pas de temps ;
- VECTOR ($\vec{x}$) : trace un aperçu en 2D de la valeur du vecteur $\vec{x}$ sur l'ensemble du domaine demandé sous la forme de flèche. Actualisé à chaque pas de temps ;

Les différentes sorties et indicateurs utilisés dans le modèle *PermetAble* sont résumés ci-dessous et détaillés à la sous-section 3.1.3 :

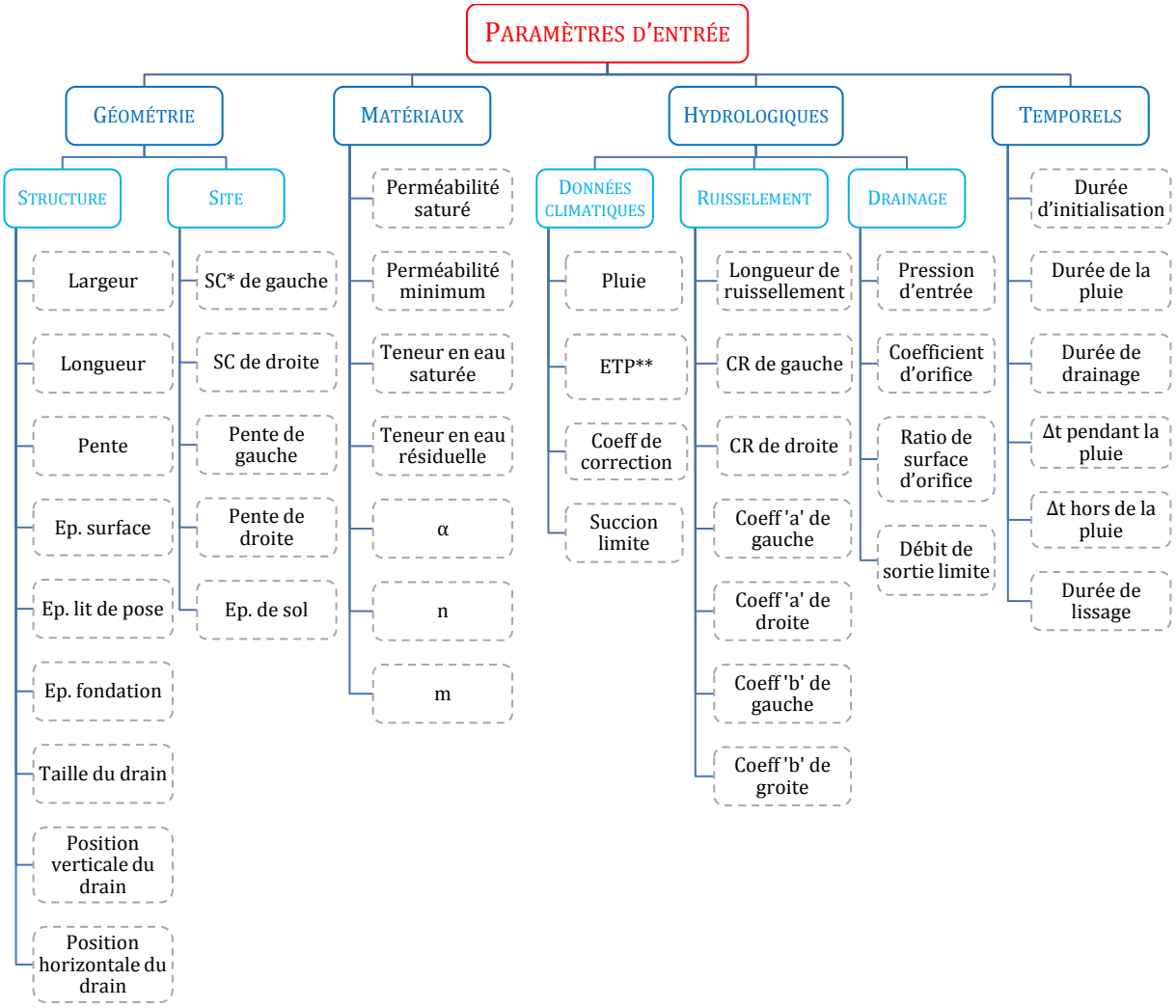
- un résumé des paramètres et des résultats de la simulation ;
- une exportation automatique des variables *h_w*, *h*, *θ_w*, et *V_w_y* sur tout le domaine et sur les coupes, au milieu et à la fin de la pluie ;
- un affichage à chaque pas de temps des variables *h_w*, *h*, *θ_w*, et *V_w_y* sur tout le domaine, sur des parties du domaine (zoom) et sur les coupes ;
- un affichage mis à jour à chaque pas de temps et une exportation de l'évolution des variables *h_w*, *h*, *θ_w*, et *V_w_y* sur chaque coupe dans chaque couche de la structure ;
- un affichage mis à jour à chaque pas de temps et une exportation de l'évolution dans le temps des indicateurs (débit entrant et sortant, volume entrant et sortant, stockage).

3.1.2 PARAMÈTRES, HYPOTHÈSES ET CONDITIONS AUX LIMITES

La sous-section précédente a souligné que le passage d'un problème physique à un modèle mathématique nécessite de poser des hypothèses de modélisation (3.1.1.1, a). Dans le cas présent, la formulation du modèle mathématique s'accompagne de la définition de nombreux paramètres. Ces paramètres peuvent être des données d'entrée du modèle (propriétés des matériaux, géométrie, etc.) ou des paramètres variables nécessaires à la résolution mathématique (teneur en eau, perméabilité). Cette sous-section présente dans un premier temps les paramètres qui sont fixes pour une simulation donnée (dit paramètres d'entrée), puis les paramètres variables du modèle.

Les paramètres d'entrée permettent d'alimenter le modèle numérique en fournissant l'ensemble des données nécessaires pour la résolution du problème. Ils sont regroupés en quatre catégories

(Figure 3.4) selon le type d'information qu'ils apportent[14]. Certains de ces paramètres (notamment les paramètres dits hydrologiques) permettent de définir les conditions aux limites du domaine. Ces conditions aux limites et les hypothèses prises pour les définir sont présentées avec les paramètres qui les concernent, et elles sont résumées à la fin de cette sous-section.



* SC = surface contributrice
** ETP = évapotranspiration potentielle

Figure 3.4 - Schéma d'ensemble des paramètres d'entrée du modèle *PermetAble*.

3.1.2.1 PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES

Les paramètres géométriques permettent à l'utilisateur de fixer la géométrie du domaine de résolution qui comprend la structure (couche de surface, lit de pose et fondation), et l'épaisseur de sol sous-jacent, et de renseigner les caractéristiques du site d'implantation de la structure. Ces paramètres sont décrits au chapitre 2 dans la sous–section 2.1.3. Étant donné que le domaine de résolution du modèle ne comprend pas les surfaces contributrices qui génèrent le ruissellement, ces dernières sont décrites par des valeurs numériques qui servent ensuite à déterminer un flux de ruissellement entrant dans la structure (3.1.2.3.c).

[14] À noter qu'à ces paramètres s'ajoutent deux paramètres généraux, non représentés ici, la constante de gravitation, g = 9,81 m·s^{-2} et le poids volumique de l'eau γ_{eau} = 9,81 kN/m^3.

Les paramètres de description géométrique du site reposent sur deux choix (hypothèses), schématiquement représentés en rouge sur la Figure 3.5.

1. Le domaine de résolution étant en 2D dans un plan vertical (X, Y), la géométrie réelle de la structure (3D) est résumée à une tranche. L'information sur la dimension manquante (Z) est représentée par un seul paramètre, la longueur de la structure, qui n'intervient pas dans le modèle numérique mais seulement pour le calcul de certains indicateurs. Ainsi le ruissellement ne peut provenir que de deux côtés (gauche et droite).

   Ce choix repose sur l'hypothèse que les écoulements dans une tranche (X, Y) sont représentatifs des écoulements réels qui eux se font dans les trois dimensions, et que les flux sur le contour du domaine modélisé peuvent être généralisés pour donner une idée des flux sur l'ensemble de la structure.

2. L'épaisseur de sol naturel modélisée correspond à la différence entre le bas de la structure et le toit de nappe. Ce choix repose sur l'hypothèse que la hauteur du toit de nappe ne varie pas pendant la durée de la simulation.

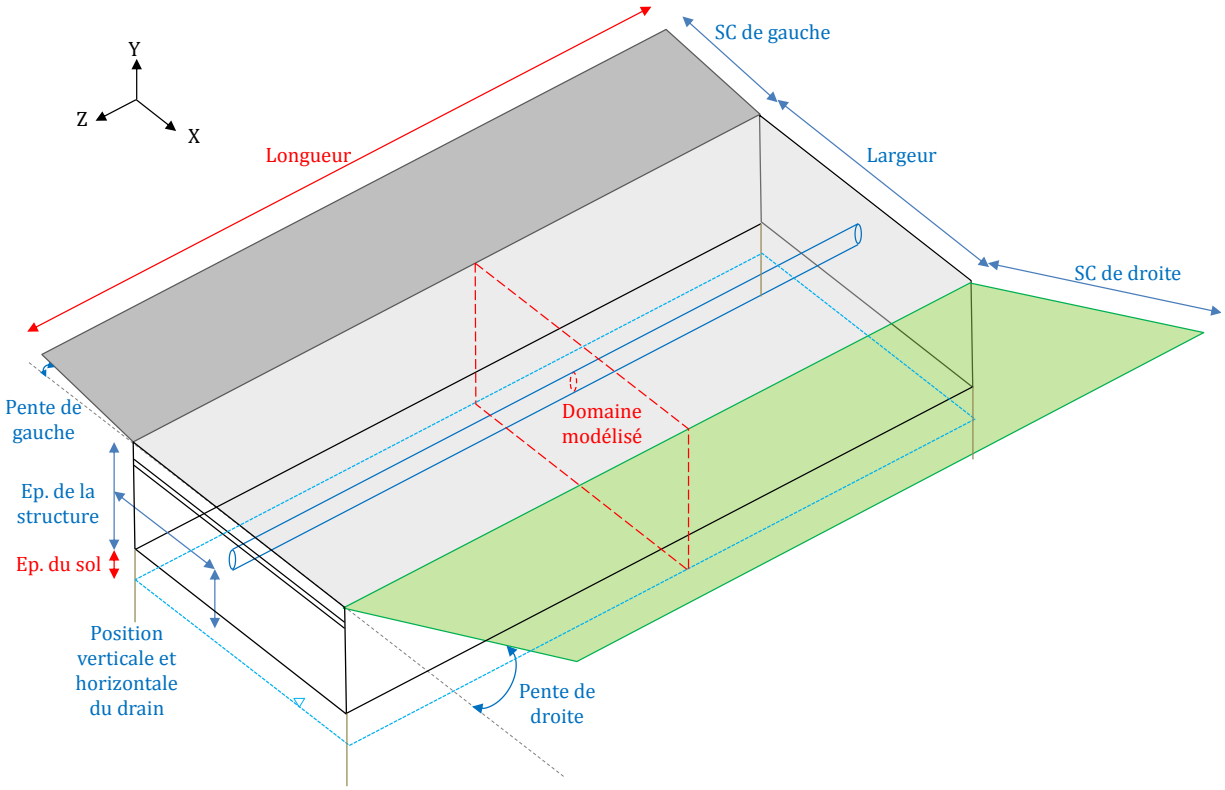


Figure 3.5 – Schéma des hypothèses de modélisation concernant la définition du domaine de modélisation de la structure perméable dans le modèle *PermetAble.*

3.1.2.2 PARAMÈTRE DES MATÉRIAUX

La modélisation mathématique repose sur les lois de VAN GENUCHTEN (Équation 3.2 et Équation 3.3). Ces lois nécessitent de renseigner six propriétés pour chaque milieu poreux modélisé :

- la perméabilité saturée, K_s, notée K_s dans le modèle ;
- la teneur en eau saturée, θ_s, notée o_s ;
- la teneur en eau résiduelle, θ_r, notée o_r ;
- les valeurs des coefficients dits de Van Genuchten : α, n et m (notés : a, n et m).

Dans la partie DEFINITION du modèle, ces six propriétés sont renseignées pour chacun des matériaux modélisés : le béton drainant, les gravillons, les graviers et le sol. La détermination de l'ensemble de ces propriétés a fait l'objet d'une attention particulière, *via* des essais en laboratoire et/ou en s'appuyant sur la littérature. Les valeurs retenues sont présentées dans la section 2.1.

Le développement du modèle a conduit à ajouter une septième propriété, la perméabilité minimum, K_{min} (noté K_min dans le modèle), pour faciliter la résolution numérique. En effet, la formulation de l'équation $K(h) = f(h)$ (Équation 3.3) conduit à une valeur $K(h)$ qui tend vers 0 à mesure que h prend des valeurs de plus en plus négatives (succion de plus en plus forte). C'est notamment le cas à la surface de la structure (dans le béton et les gravillons) au début des simulations, quand ces matériaux sont secs et que la teneur en eau est proche de la teneur en eau résiduelle. Or, une valeur de $K(h)$ très faible se traduit dans le modèle par un potentiel de flux entrant (ou sortant) quasiment nul, compte tenu de la formulation mathématique du problème. Ainsi, lorsqu'un flux entrant (pluie et ruissellement) est imposé en condition limite, le modèle est incapable d'initier la simulation puisqu'il ne parvient pas résoudre la condition de flux imposée avec une valeur de $K(h)$ proche de zéro.

Dans la réalité, la perméabilité d'un milieu poreux sec (béton drainant ici) est effectivement proche de zéro, mais sa capacité d'absorption est maximum comme cela est expliqué dans l'annexe A. La pluie est donc absorbée sans problème par le béton drainant, ce qui conduit à augmenter la teneur en eau, à diminuer la succion dans les pores de surface et donc à augmenter la valeur de perméabilité ; un front d'infiltration se met ainsi en place.

Pour que le modèle numérique arrive à initier ce mécanisme de front d'infiltration, la modélisation de l'entrée de l'eau dans la structure a fait l'objet d'une attention particulière. Trois adaptations du modèle sont utilisées :

- le lissage des transitions d'intensité de pluie (détaillé en 3.1.2.3.a) à l'aide de la commande SWAGE ;
- la définition d'un maillage plus fin de la couche de surface et du lit de pose à l'aide de la commande MESH_DENSITY. Cette commande permet de spécifier une taille de maillage pour des régions spécifiques. L'extrait de code ci-dessous illustre le forçage d'un maillage très fin (densité forte) en surface, la taille des mailles augmente ensuite avec la profondeur (Y = 0 à la surface, axe orienté positivement vers le haut) ;

```
REGION 3 'Surface'
        MESH_DENSITY = 50+400 * (Y + X * Structure_Slope)  ! Defines the mesh density on the surface layer
```

- L'utilisation d'une valeur de perméabilité minimum pour les matériaux. Ainsi la loi de VAN GENUCHTEN n'est utilisée pour calculer $K(h)$ que tant que cette valeur est supérieure au K_{min} fixé.

  Ce qui conduit à la formulation suivante des deux lois de VAN GENUCHTEN dans le code.

```
! SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE (SWCC) - FROM VAN GENUCHTEN LAW
        o_w = IF h_w < 0 THEN o_r + (o_s - o_r)*(1/(1+(a*ABS(h_w))^n))^(m) ELSE o_s
```

```
! SLOPE OF THE SWCC : m_w = d(o_w)/d(h)[15]
        m_w = IF h_w < 0 THEN ((1-n)*ABS(-a*h_w)^n*(1+ABS(-a*h_w)^n)^((1/n)-2)*(o_s-o_r))/h_w ELSE 1
! EFFECTIVE WATER SATURATION[16]
        o_e = (o_w - o_r )/(o_s - o_r )
! PERMEABILITY - FROM VAN GENUCHTEN LAW
        K_w = IF h_w < 0 THEN MAX(K_min ; K_s*SQRT(o_e)*(1 - (1 - o_e^(1/m))^m)^2) ELSE K_s
```

Ce choix constitue une hypothèse de modélisation importante. Il conduit également à introduire un nouveau paramètre de description des matériaux, K_{min}, qui, contrairement aux autres, n'a pas de réalité physique et ne peut donc pas être mesuré. La valeur de K_{min} de chaque matériau doit donc être déterminée par calage du modèle avec des données expérimentales. Les conséquences de cette hypothèse sur les résultats du modèle sont développées dans la section 3.2.

3.1.2.3 PARAMÈTRES HYDROLOGIQUES

La désignation de « paramètres hydrologiques » regroupe trois types de données bien différentes : les données climatiques, les données de caractérisation du ruissellement et les données de caractérisation du drain. Toutes ces données ont comme point commun de décrire les flux hydrologiques en entrée (pluie et ruissellement) ou en sortie (drain et évaporation) de la structure.

a. Modélisation des précipitations directes

Les données pluviométriques utilisées sont présentées dans la section 2.4. Il s'agit d'événements ou de séries d'événements historiques. L'intensité de la pluie en fonction du temps est renseignée dans le modèle soit *via* l'importation d'un fichier (.tab), soit par une description rédigée dans le code directement. Cette intensité est ensuite appliquée comme flux imposé en tant que condition limite en surface de la structure. La description dans FlexPDE de l'orage du 22 juillet 2013 est donnée ci-dessous à titre d'illustration.

```
Rain_real =
 IF t <    3600 - 360 THEN 000E+00 ELSE
 IF t>=  3600 - 360 AND t< 5400 - 360 THEN SWAGE(t- 3600, 000E+00, 004E-06, 90) ELSE
 IF t>=  5400 - 360 AND t< 7200 - 360 THEN SWAGE(t- 3600, 004E-06, 007E-06, 90) ELSE
 [...]
 IF t>=  12600 - 360 AND t< 14400 - 360 THEN SWAGE(t- 3600, 139E-09, 422E-09, 90) ELSE
 IF t>=  14400 - 360 AND t< 16200 - 360 THEN SWAGE(t- 3600, 422E-09, 004E-06, 90) ELSE
000E+00
```

Cet exemple montre l'utilisation de la commande SWAGE, mentionnée précédemment, qui permet de lisser les transitions de valeur d'intensité. La Figure 3.6 illustre les débits entrant et sortant générés par la pluie décrite ci-dessus dans un des scénarios étudiés (scénario de référence). Les transitions de valeurs de débit apparaissent bien lissées et non en créneaux à angle droit. Ce choix de modélisation facilite la résolution numérique. Malgré cela, des

[15] L'utilisation du paramètre de calcul *m_w* permet de palier l'impossibilité de dériver un paramètre par rapport à une variable autre qu'une variable d'espace ou de temps dans FlexPDE.
[16] La teneur en eau effective, *o_e*, est utilisée ici pour d'alléger l'expression de la perméabilité, *K_w*.

oscillations restent visibles au début de la pluie avec un débit entrant qui oscille légèrement autour de la valeur théorique. Elles sont dues à la difficulté d'initier le front d'infiltration et à la méthode de calcul du débit (détaillée à la sous-section 3.1.3.2).

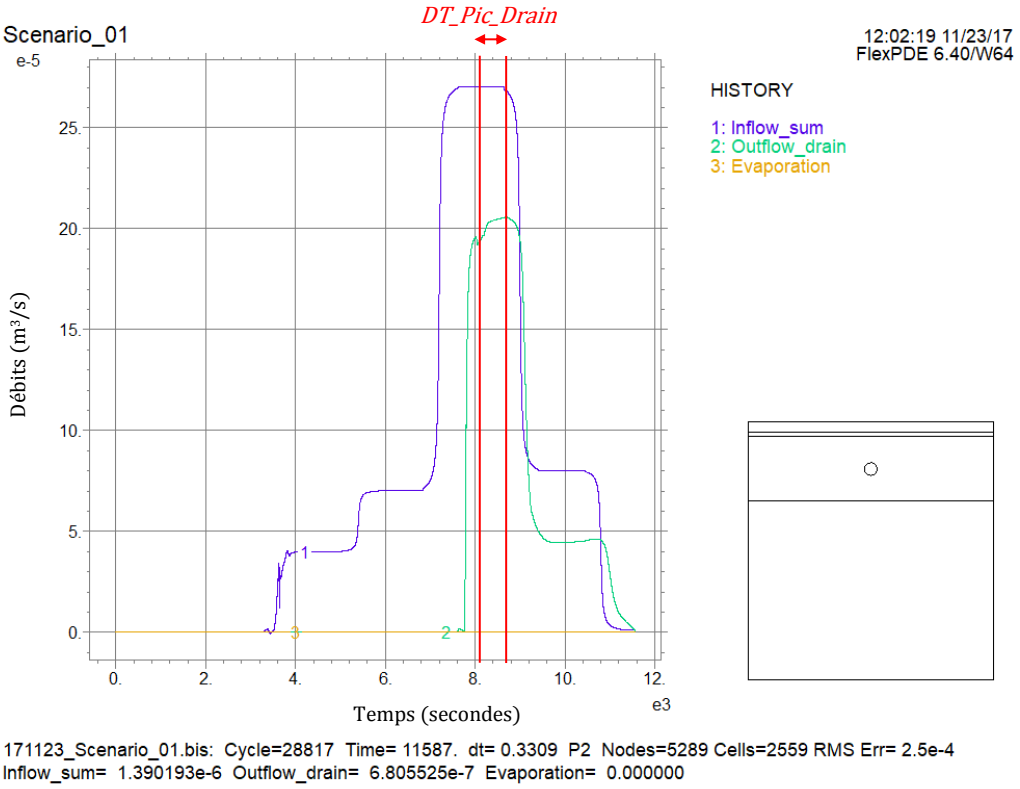


Figure 3.6 - Sortie graphique modèle *PermetAble*. Représentions des hydrographes des débits entrant et sortant (Scénario de référence).

b. Modélisation de l'évaporation

La caractérisation des données d'évaporation n'est pas totalement aboutie dans ce travail. En effet, FlexPDE permettrait potentiellement d'aller jusqu'à la modélisation thermo-hydrologique des flux de chaleur et d'eau dans la structure. L'évaporation serait alors caractérisée avec des données climatiques (température, saturation en eau de l'air, rayonnement, etc.) qui permettraient au modèle de calculer le flux d'eau évaporé (évapotranspiration réelle – ETR) en fonction de la demande (évapotranspiration potentielle - ETP) et de la quantité d'eau disponible à l'évaporation.

Le modèle développé dans ce travail se limite cependant à la modélisation des flux d'eau, l'évaporation est donc directement renseignée dans le modèle sous la forme d'une valeur de flux d'évaporation potentiel. Pour calculer ce flux, deux paramètres sont utilisés : une valeur d'ETP (nommée PET dans le modèle) et un coefficient de correction (*PET_c*). Les valeurs d'ETP utilisées dans ce travail correspondent à celles calculées par la station Météo-France de Caen-Carpiquet avec la formule de PENMAN pour la période de 1981 à 2010. Trois valeurs sont notamment utilisées, une moyenne d'ETP annuelle (2 mm/jour), une moyenne d'ETP dite d'été (4 mm/jour) et une moyenne d'ETP dite d'hiver (1 mm/jour). Cette valeur d'ETP peut être ensuite corrigée par le coefficient de correction qui permet de passer d'une valeur d'ETP calculée pour 1 m² d'herbe à une valeur d'ETP (ou plus exactement d'évaporation potentielle EP) propre au matériau de surface utilisé.

Enfin, à partir du flux d'évaporation potentiel (EP), un flux d'évaporation réel (ER) est calculé pour tenir compte de la quantité d'eau réellement disponible dans la structure pour l'évaporation. Sachant que la modélisation mathématique repose sur la résolution de l'équation de RICHARDS avec h comme variable, une équation a été définie pour calculer l'ER à partir de l'EP et de h (Équation 3.5). C'est cette équation qui est utilisée comme condition limite en surface.

Équation 3.5 - ER

$$ER = EP \cdot (1 - \frac{h}{h_r})$$

Cette équation repose sur la définition d'un paramètre h_r appelé pression limite d'évaporation, qui correspond à la pression intersticielle pour laquelle la teneur en eau devient égale à la teneur en eau résiduelle. La Figure 3.7 permet de visualiser concrètement l'effet de cette formulation sur le flux d'évaporation réelle calculé à partir d'une valeur d'EP fixe.

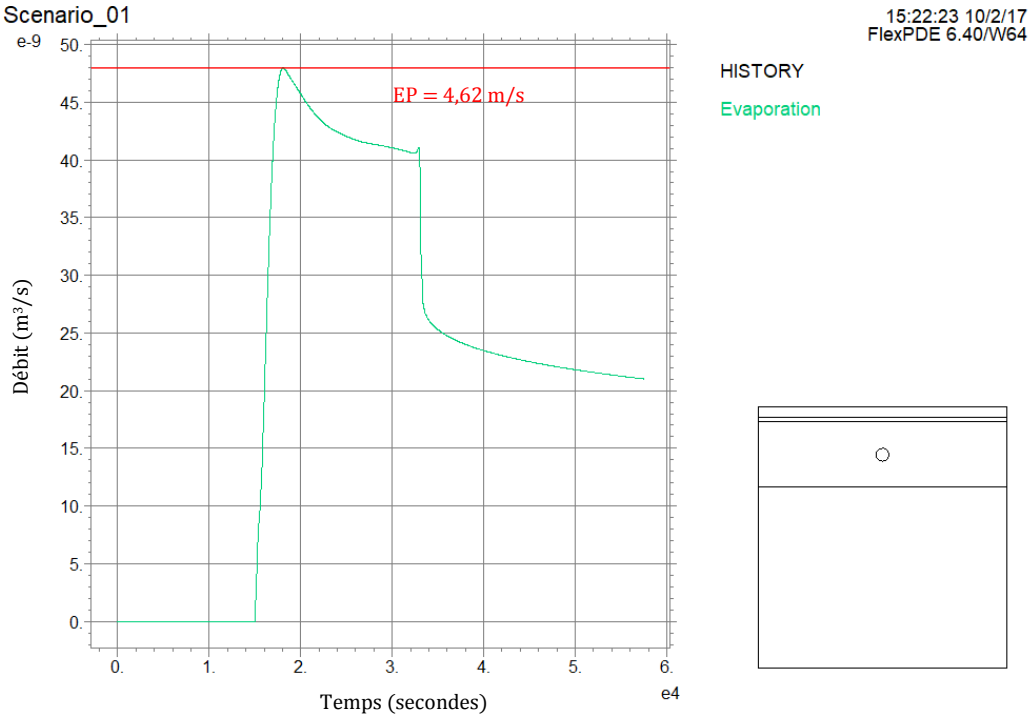


Figure 3.7 - Sortie graphique du modèle *PermetAble* représentant le débit évaporé en fonction du temps (scénario de référence) (EP = $2{,}31 \cdot 10^{-8}$ m/s/m^2, structure de 2 mètres, soit un débit d'évaporation maximum de $4{,}62 \cdot 10^{-8}$ m^3/s.).

c. *Modélisation du ruissellement*

Comme cela est présenté à la sous-section 2.1.3, le volume de ruissellement est calculé par la formule suivante, $V_r = (Pluie - Interception) \times C_r \times S$ (Équation 2.11). Le débit ainsi calculé est ensuite appliqué comme condition limite. Cette formulation nécessite de renseigner une valeur d'interception et de coefficient de ruissellement. Le coefficient de ruissellement est renseigné directement en donnant une valeur pour chaque surface contributrice (droite et gauche). La valeur d'interception peut être calculée à partir de la pente et des paramètres a et b pour chaque surface contributrice selon la formule dite de CHOCAT. Cette valeur est alors ensuite retranchée à la pluie réelle (appelée Rain_real) pour obtenir une valeur de pluie efficace (appelée *Rain_effective*) comme cela est présenté dans l'extrait de code suivant.

Dans le cadre de ce travail seul le coefficient de ruissellement est utilisée pour le calcul du ruissellement entrant.

```
! RUNOFF CALCULATION

    Interception_left = IF Catchment_slope_left > 0.03 THEN Catchment_a_left ELSE Catchment_a_left +
    catchment_b_left * (0.03 - Catchment_slope_left)

    Rain_effective_left = IF Total_Rain < Interception_left THEN 0 ELSE Rain_real

    Runoff_left = Rain_effective_left*Runoff_c_left * Surf_left / (Structure_length * Runoff_surf)
```

La dernière ligne du code présenté ci-dessus fait apparaître un paramètre appelé *Runoff_surf*. Ce paramètre correspond à la longueur de diffusion du ruissellement en surface. En effet, pour faciliter la résolution numérique et être plus proche de la réalité, la condition limite du flux entrant de ruissellement n'est pas appliquée en un seul point mais sur une certaine longueur à gauche et à droite de la surface du domaine. La Figure 3.8 illustre ce choix de modélisation.

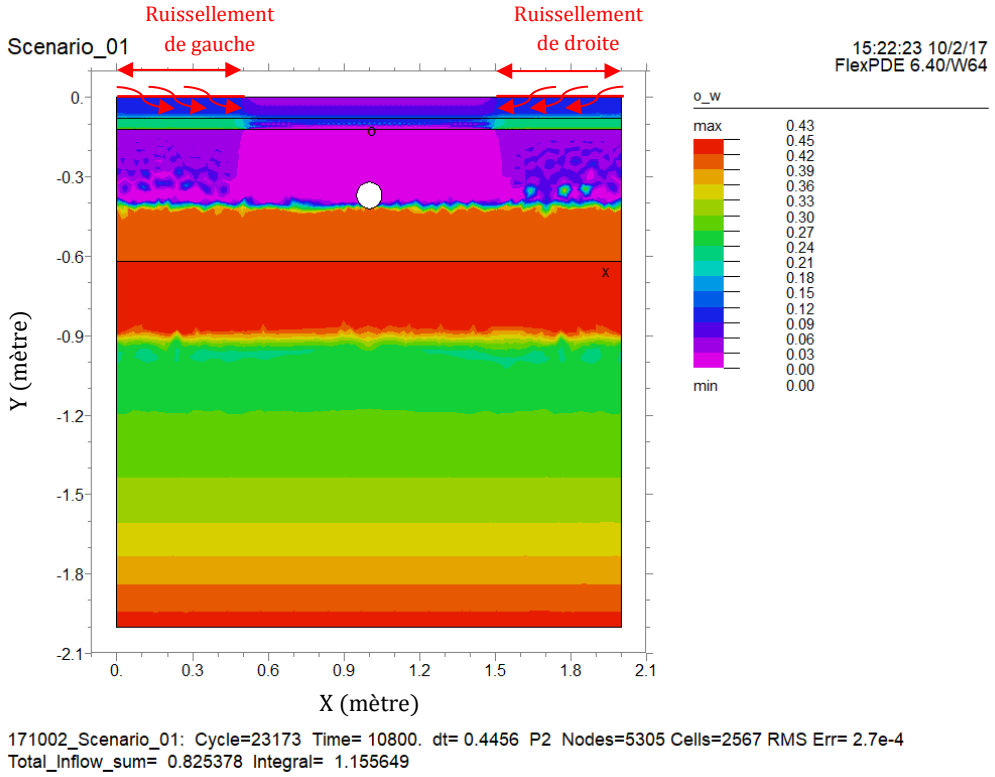


Figure 3.8 - Schématisation du rôle de la surface de diffusion du ruissellement (Runoff_surf = 50 cm). Image issue du modèle *PermetAble* représentant la valeur de teneur en eau sur tout le domaine de résolution (Scénario de référence).

Ce choix de modélisation repose notamment sur l'observation du ruissellement sur le site expérimental d'Épron où une telle surface de diffusion est très nettement visible lors des événements importants. Ces observations de terrain ont permis de mettre en évidence que la longueur de diffusion est croissante avec l'intensité de la pluie et avec le colmatage (Annexe B).

La modélisation du ruissellement demande donc de renseigner le paramètre *Runoff_surf*. En théorie ce paramètre est propre à chaque surface contributrice, de droite et de gauche. Dans les faits, l'analyse de sensibilité (3.3.1) a montré que sa valeur a une faible influence sur les résultats, aussi une valeur unique de 20 ou de 50 cm est utilisée dans la majorité des simulations.

d. Modélisation du débit drainé

Seul le périmètre du drain (interface entre la fondation et l'intérieur du drain) est considéré dans le modèle puisque ce dernier est réalisé par extrusion et que son volume intérieur n'appartient donc pas au domaine de résolution. Ce périmètre constitue une frontière extérieure au domaine sur laquelle une condition aux limites doit donc être renseignée.

Les observations réalisées lors des expériences sur banc d'essai ont montré que l'évacuation par le drain s'accompagne d'une légère mise en charge de ce dernier. En effet, l'eau n'est pas évacuée seulement par le point le plus bas du drain mais sur une certaine surface qui varie en fonction de la hauteur de drain immergée. Pour retranscrire ce comportement dans le modèle numérique, une équation de type orifice a été utilisée pour définir le débit sortant par le drain.

Équation 3.6 - Drain

$$Q_{drain} = CO_{drain} \cdot Ratio_{drain} \cdot \sqrt{2gh}$$

Avec CO_{drain} (*Drain_c*), le coefficient d'orifice, et $Ratio_{rain}$ (Drain_ratio), la surface de vides (orifices) pour 1 m² de surface de drain. Le $Ratio_{drain}$ est déterminé à partir de la fiche technique du drain utilisé sur les sites expérimentaux ($Ratio_{drain}$ = 0,067 m²/m²). La valeur par défaut du coefficient d'orifice prise égale à 0,6. Un calage de ce paramètre est effectué par la suite (3.2.1.2).

Deux autres paramètres sont également utilisés dans le modèle. Un premier, *Drain_h_min*, impose une valeur de pression minimum pour qu'un drainage puisse avoir lieu. Par défaut, cette valeur est fixée à 0 mais elle peut être ajustée pour représenter au mieux le drain utilisé (dans le cas d'un drain à cunette par exemple). Le second, *Drain_Q_max*, permet de fixer un débit de drainage maximum pour traduire une condition de rejet maximum ou la mise en saturation aval du réseau. La Figure 3.9 illustre l'effet de l'usage d'un débit limite sur le comportement du drain.

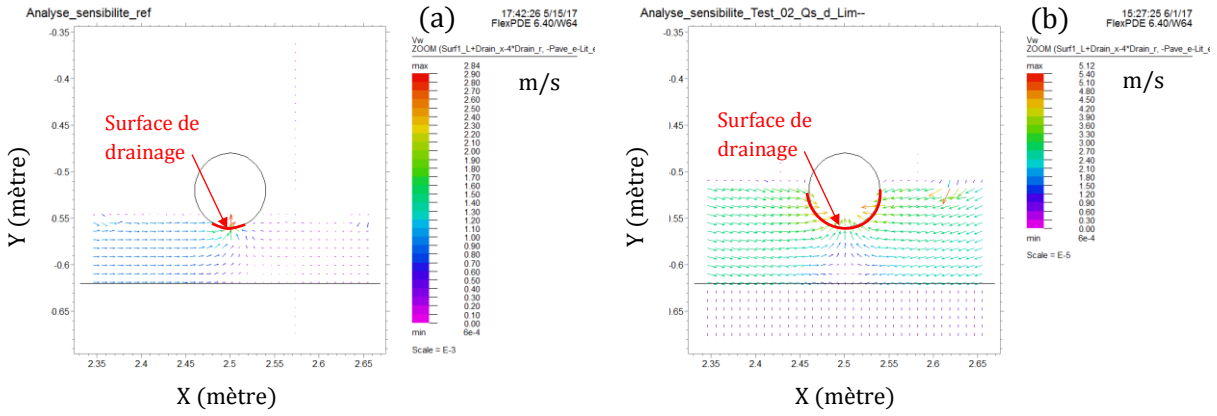


Figure 3.9– Sorties du modèle *PermetAble* représentant la vitesse de filtration sur une partie du domaine zoomée autour du drain. (a) Pas de débit de drainage limite (b) Débit de drainage limite = 0,72 L/min.

3.1.2.4 PARAMÈTRES TEMPORELS

L'appellation 'paramètres temporels' désigne les paramètres qui renseignent la durée de la simulation, le pas de temps de calcul et de sortie des résultats et la durée de lissage de la pluie. Ces paramètres sont liés aux données pluviométriques. En effet, la durée de la simulation est déterminée comme la somme :

- d'une durée d'initialisation (fixée à 1 heure) qui permet d'assurer un état initial stable ;
- de la durée de la pluie simulée ;

- d'une durée de drainage (fixée à 12 heures) ;

Concernant le pas de temps de résolution, deux valeurs sont utilisées. Une première pour la période d'initialisation et de drainage (fixée à 60 secondes) et une deuxième pour la période de pluie (généralement fixée à 1 seconde). Ce pas de temps sert de référence à FlexPDE pour fixer l'intervalle de temps de résolution. Si besoin, il est redécoupé automatiquement par le logiciel pour atteindre l'erreur maximum autorisée. Néanmoins, si le logiciel ne trouve pas rapidement un pas de calcul temporel adapté, il arrête la simulation. C'est à l'utilisateur de la relancer en adaptant le pas de temps de départ ou en révisant la précision souhaitée. Ce pas de temps est également utilisé pour définir l'intervalle d'affichage des sorties du modèle.

Enfin, la durée de lissage des changements d'intensité de la pluie a déjà été abordée. Elle est fixée à 120 secondes dans la majorité des cas et à 360 secondes pour les pluies plus fortes (événements et séries extrêmes).

3.1.2.5 VARIABLES DU MODÈLE

Les variables désignent les grandeurs qui varient au cours d'une même simulation (h, $\theta(h)$, $K(h)$, $H(h)$ et $\vec{q}(h)$).

Deux de ces variables sont requises pour la résolution numérique du modèle, $\theta(h)$ et $K(h)$ (3.1.1.1.a). Toutes sont utilisées pour l'affichage des résultats (sorties) du modèle et pour calculer les indicateurs de sortie.

3.1.2.6 CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites définies dans le modèle s'appuient sur les varibles présentées précédemment. Ces conditions imposées aux frontières extérieures du domaine sont illustrées sur le schéma (Figure 3.10) et résumées dans le Tableau 3.2. Cinq zones différentes sont identifiées pour décrire les différentes conditions aux limites utilisées.

- Zone 1 : les deux extrémités extérieures de la surface (partie droite et/ou gauche de la limite supérieure). Ces zones correspondent aux surfaces qui reçoivent la pluie directe, plus le ruissellement éventuel. Une condition aux limites de NEUMANN, flux imposé, est utilisée :
    - pendant la pluie: Débit entrant = Ruissellement + Pluie directe ;
    - hors des périodes de pluie : Débit sortant = Évaporation réelle.

  À noter qu'en l'absence de ruissellement sur l'un ou l'autre (voire les deux) côtés ces zones se comportent comme la partie centrale.
- Zone 2 : la partie centrale de la couche de surface qui ne reçoit que les précipitations directes. Une condition aux limites de NEUMANN, flux imposé, est utilisée :
    - pendant la pluie : Débit entrant = Pluie directe ;
    - hors des périodes de pluie : Débit sortant = Évaporation réelle.
- Zone 3 : les deux parois verticales de la structure. Ces parois sont considérées comme imperméables (usage d'une géomembrane). Une condition aux limites de NEUMANN, flux nul, est appliquée.

- Zone 4 : la limite inférieure du domaine de résolution. Cette limite correspond à la surface libre du toit de nappe dans la couche de sol. Ce toit de nappe est considéré stable pendant la durée de la simulation, aussi une condition aux limites de DIRICHLET, valeur imposée, est utilisée : $h = 0$.

  L'hypothèse d'un toit de nappe stable s'appuie sur le fait que les volumes d'eau infiltrés *via* la structure sont négligeables devant le volume de la nappe, et que la temporalité d'une simulation (durée d'un événement) est courte par rapport à celle des fluctuations de nappe. Cette hypothèse est d'autant plus vérifiée que le volume de nappe est important. Par contre, cette hypothèse n'exclut pas des variations saisonnières du toit de nappe. Pour les prendre en considération, il convient de lancer différentes simulations.

  Différents auteurs (Berthier, 1999; Brunetti et al., 2016) utilisent également cette condition aux limites pour représenter les écoulements de l'eau vers la nappe.

- Zone 5 : le périmètre du drain. Une condition aux limites de NEUMANN, flux imposé, est utilisée. La valeur de flux imposée dépend de la pression interstitielle au niveau du drain par rapport à la valeur h_{min} fixée (sauf mention contraire $h_{min} = 0$) :
  - Si $h < h_{min}$: Flux nul ;
  - Si $h > h_{min}$ $(= 0)$: Valeur du flux (débit sortant) calculée par une équation d'orifice (Équation 3.6).

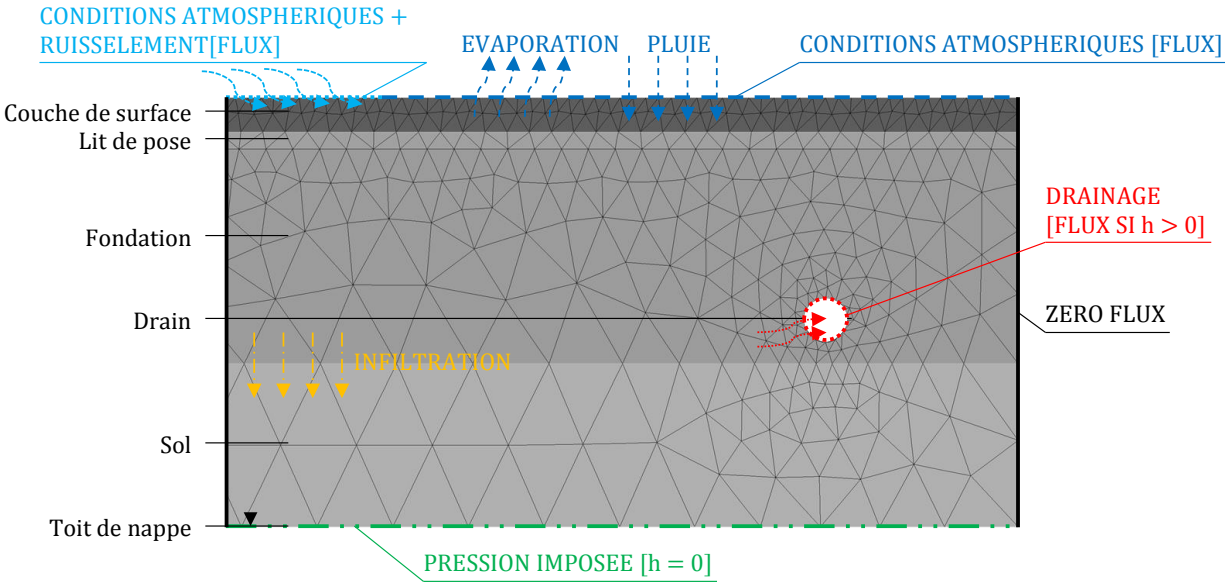


Figure 3.10 - Schéma des conditions aux limites utilisées dans le modèle *PermetAble*.

À noter que si l'infiltration n'est pas permise (géomembrane imperméable au fond de la structure) la couche de sol n'est pas représentée et qu'une condition aux limites de NEUMANN, flux nul, est utilisée.

Le Tableau 3.2, résume ces conditions aux limites en donnant leur signification mathématique et leur transcription dans le code. Pour comprendre le passage d'une écriture à l'autre, il convient de préciser le sens de la commande NATURAL(h) et VALUE(h) dans le logiciel FlexPDE.

Le point de départ est l'EDP que le modèle numérique va chercher à résoudre (Équation 3.1). Le théorème de GREEN-OSTROGRADSKI (utilisé en 2D ici) permet d'écrire que l'intégrale de la

divergence d'un champ vectoriel sur une surface (S) est égale à l'intégrale du flux normal de ce champ à travers le contour (C) de cette surface. L'Équation 3.1 peut ainsi s'écrire de la façon suivante.

Équation 3.7 – Formule de GREEN-OSTROGRADSKI

$$\iint_S div\left(-K(h) \times \overrightarrow{grad}(h+z)\right) \cdot dS = \oint_C \vec{n} \cdot (-K(h) \times \overrightarrow{grad}(h+z)) \cdot dl = \iint_S -\frac{\partial \theta(h)}{\partial h} \times \frac{\partial h}{\partial t} \cdot dS$$

La valeur $\vec{n} \cdot (-K(h) \times \overrightarrow{grad}(h+z))$ représente alors le flux qui passe au travers du contour pour entrer ou sortir de la surface considérée. C'est cette valeur qui est imposée avec l'utilisation de la commande NATURAL(h). Physiquement, cette valeur correspond à la valeur normale de la vitesse de filtration sur le contour du domaine ($\vec{n} \cdot \vec{q}$) intégrée sur la longueur d'un segment du contour, cette valeur correspond bien à un débit linéaire entrant ou sortant. À partir de la connaissance de ce flux le modèle numérique permet de déterminer la valeur de *h.* La commande VALUE(h) quant-à-elle impose directement une valeur pour *h*.

Tableau 3.2 – Formulation mathématique et rédaction du code de modélisation des conditions aux limites.

	Formulation mathématique	Rédaction dans le code
1	$\vec{n} \cdot \vec{q} = \vec{n} \cdot (-K(h) \cdot \overrightarrow{grad}(h+y))$ $= \begin{cases} -Pluie\ directe - Ruissèlement, & Pluie > 0 \\ EP \cdot \left(1 - \frac{h}{h_r}\right), & Pluie = 0\ ET\ h > h_r \\ 0, & Pluie = 0\ ET\ h \leq h_r \end{cases}$	NATURAL(h_w) = IF Rain_real = 0 THEN (IF h_w > -h_r THEN RET*(1 - h_w /h_r) ELSE 0) ELSE - Rain_real - Runoff_left
2	$\vec{n} \cdot \vec{q} = \vec{n} \cdot (-K(h) \cdot \overrightarrow{grad}(h+y))$ $= \begin{cases} -Pluie\ directe, & Pluie > 0 \\ EP \cdot \left(1 - \frac{h}{h_r}\right), & Pluie = 0\ ET\ h > h_r \\ 0, & Pluie = 0\ ET\ h \leq h_r \end{cases}$	NATURAL(h_w) = IF Rain_real = 0 THEN (IF h_w > -h_r THEN RET*(1 - h_w /h_r) ELSE 0) ELSE - Rain_real
3	$\vec{n} \cdot \vec{q} = \vec{n} \cdot (-K(h) \cdot \overrightarrow{grad}(h+y)) = 0$	NATURAL(h_w) = 0
4	$h = 0$ OU (si le fond de la structure est imperméabilisé) $\vec{n} \cdot \vec{q} = \vec{n} \cdot (-K(h) \cdot \overrightarrow{grad}(h+y)) = 0$	VALUE(h_w) = 0 OU NATURAL(h_w) = 0
5	$\vec{n} \cdot \vec{q} = \vec{n} \cdot (-K(h) \cdot \overrightarrow{grad}(h+y))$ $= \begin{cases} CO_{drain} \cdot S_{drain} \cdot \sqrt{2gh}, h > -h_r\ ET\ Q_{drain} < Q_{max} \\ Q_{max}, \quad h > -h_r\ ET\ Q_{drain} \geq Q_{max} \\ 0, \quad h \leq -h_r \end{cases}$	NATURAL(h_w) = IF h_w >Drain_h_min THEN (IF Q_drain < Q_drain_max THEN Q_drain ELSE Q_drain_max) ELSE 0

3.1.3 SORTIES DU MODÈLE ET INDICATEURS

L'objectif de ce travail de modélisation est de décrire et de quantifier les processus hydrologiques au sein des structures à revêtements perméables. Compte tenu de ce double objectif de description et de quantification, les sorties du modèle se divisent en deux grandes catégories : des sorties descriptives et des sorties quantitatives.

Les sorties descriptives (3.1.2.5) correspondent à l'affichage des différents paramètres variables, sur tout ou partie du domaine de résolution, à chaque pas de calcul. Ces sorties sont complétées

par des visualisations plus spécifiques de ces paramètres variables : des coupes verticales et des graphiques d'évolution en fonction du temps.

Les sorties quantitatives reposent sur la définition d'indicateurs quantifiables numériquement. Ces indicateurs sont plus généralement appelés « résultats » par la suite. Dans l'analyse des différentes simulations, ces indicateurs sont également parfois désignés par le terme « variables descriptives », en opposition aux paramètres d'entrée décrits précédemment (3.1.2.1 à 3.1.2.4) qui seront parfois désignés comme « variables explicatives ».

3.1.3.1 SORTIES DESCRIPTIVES

L'une des spécificités du logiciel FlexPDE par rapport à un logiciel spécialisé est de permettre à l'utilisateur de définir lui-même les sorties souhaitées. Aussi lors des différentes versions du développement du code du modèle *PermetAble*, de nombreuses sorties de visualisation de l'évolution des paramètres variables ont été utilisées pour s'assurer de la cohérence et de la pertinence du comportement hydrologique simulé par le modèle. Seules les principales visualisations, conservées dans la version finale du code proposée en annexe E, sont décrites ici. Sur toutes les figures issues de FlexPDE les unités sont données dans le système international (distances en mètre, volumes en m^3, vitesses en m/s et temps en secondes).

a. Visualisation directe des paramètres sur tout ou partie du domaine

Cette visualisation directe est appelée par la commande CONTOUR(x) pour les paramètres scalaires et VECTOR($\vec{x}$) pour les paramètres vectoriels. Ces commandes tracent une représentation graphique des valeurs de h, θ et des composantes sur X et Y du vecteur $\vec{q}$. Le vecteur $\vec{q}$ est également directement affiché sur un quatrième graphique sous la forme de flèches (Figure 3.11). Ces quatre graphiques sont tracés sur l'ensemble du domaine (Figure 3.13), ainsi que sur deux zooms : l'angle supérieur gauche (correspondant à la zone d'entrée du ruissellement) et le drain (Figure 3.11). Les graphiques sont mis à jour à chaque pas de temps.

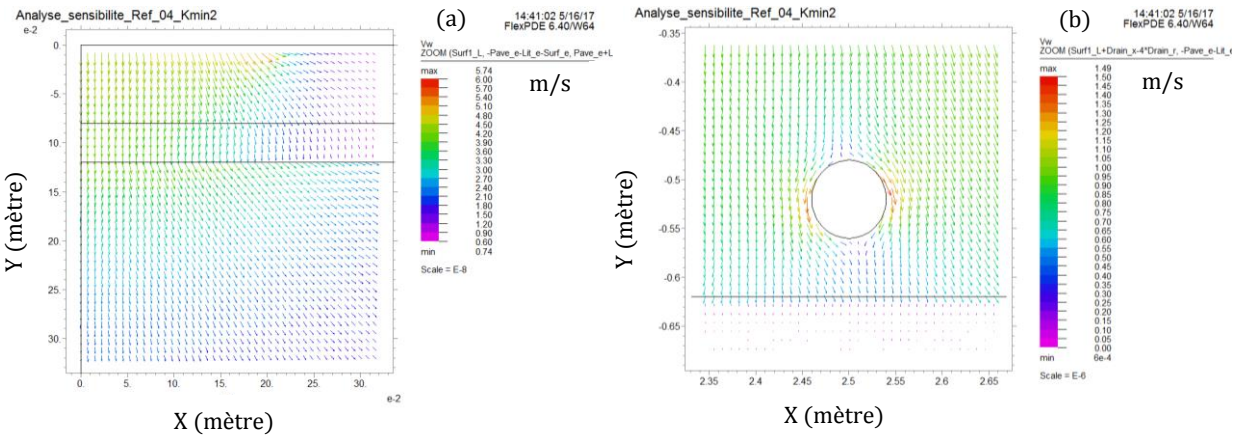


Figure 3.11 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de la vitesse de filtration (vecteur $\vec{q}$), zoom sur l'entrée du ruissellement (a) et sur le drain (b).

La Figure 3.12, illustre l'intérêt d'une telle visualisation. Elle permet dans l'exemple en question de suivre la progression du front d'infiltration au niveau de l'arrivée du ruissellement grâce à l'affichage de la valeur de h et de θ.

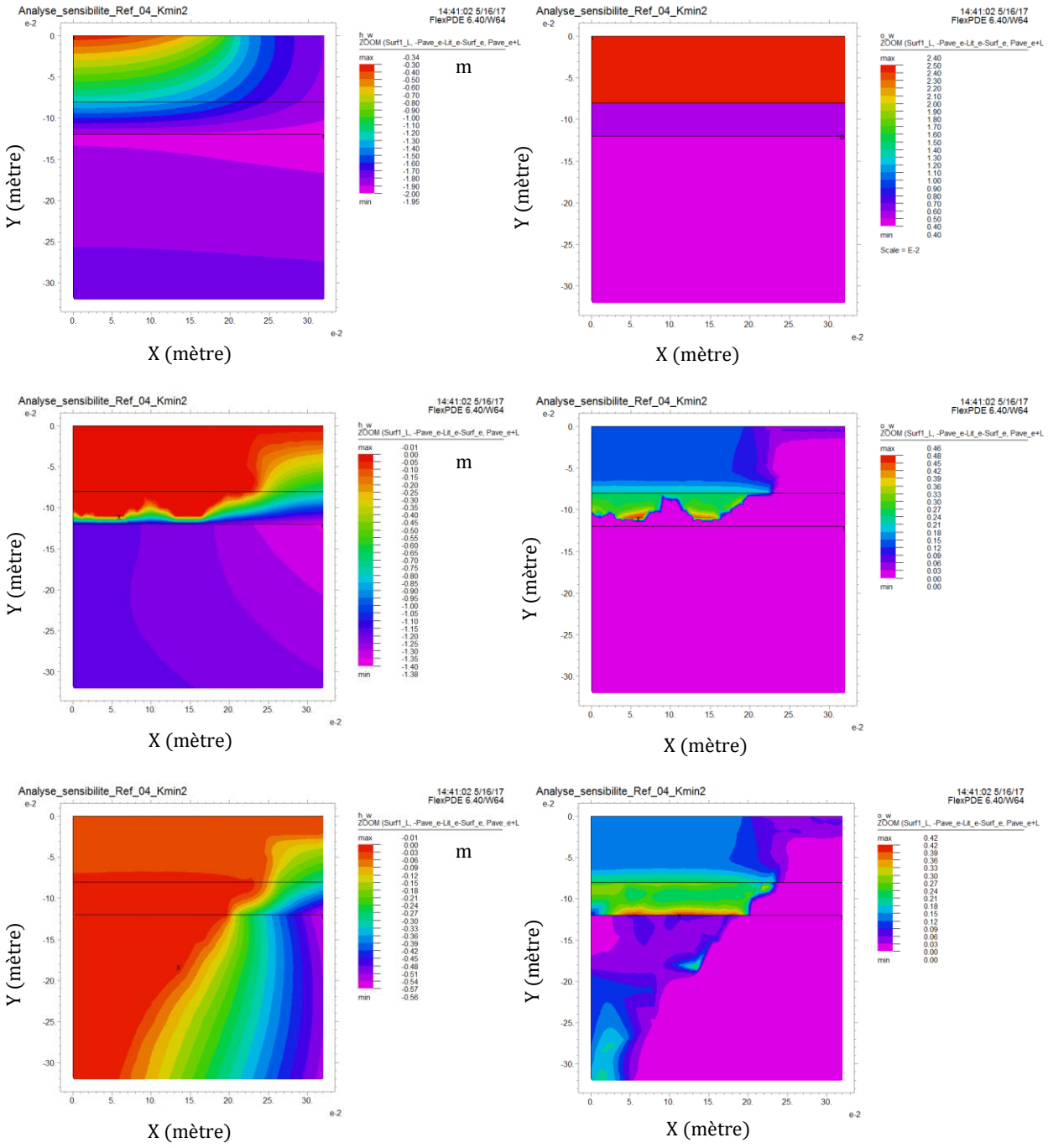


Figure 3.12 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution de h (gauche) et de θ *(droite)*. Zoom sur la partie supérieure gauche (entrée du ruissellement) à trois instants différents : $t = 3237, 3771$ et 3872 secondes.

Toutes ces visualisations peuvent être exportées manuellement au choix de l'utilisateur ou automatiquement. Les images ainsi exportées permettent de comparer visuellement le comportement de la structure dans différentes configuration. Les visualisations sur l'ensemble du domaine (Figure 3.13) ont ainsi été couramment utilisées pour mieux appréhender et expliquer des résultats quantitatifs obtenus.

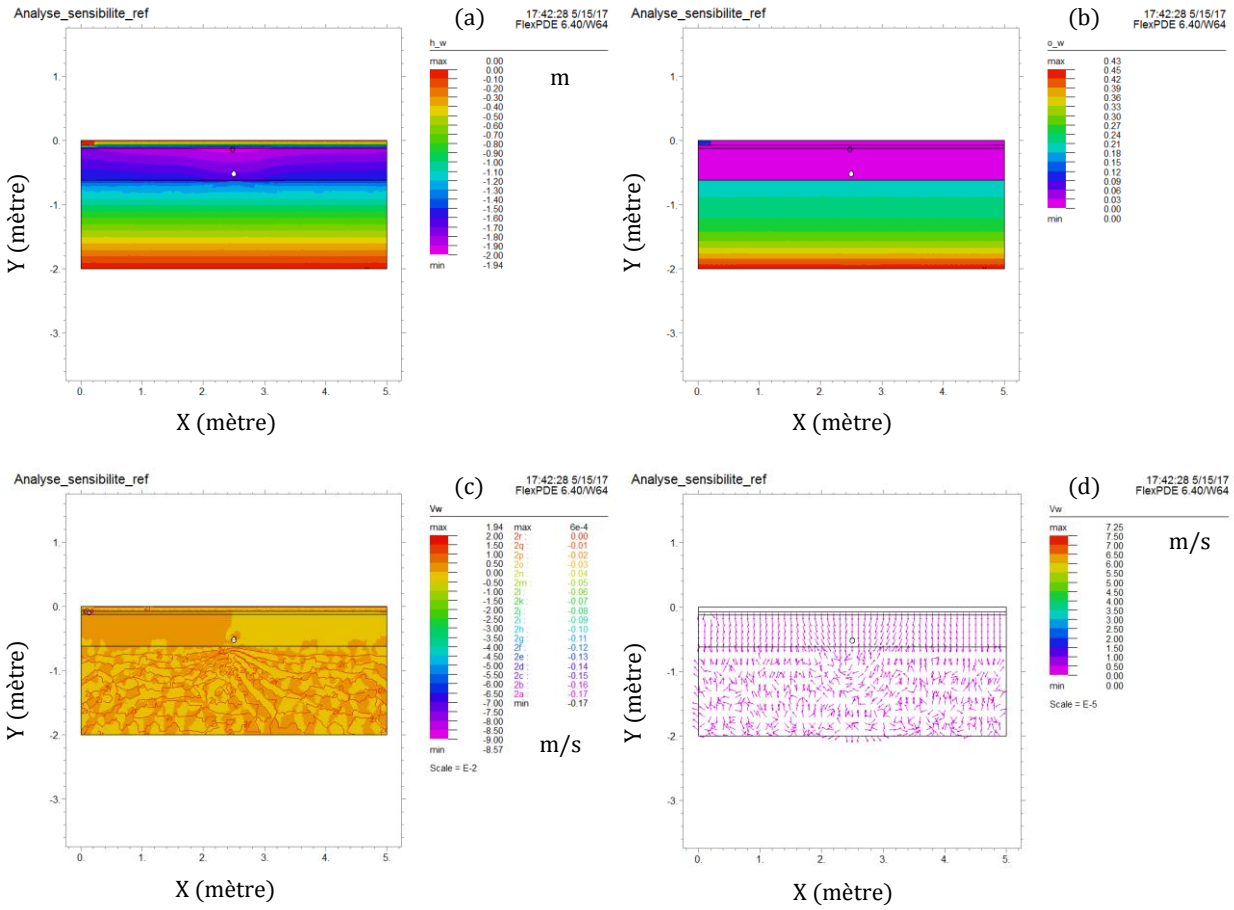


Figure 3.13 – Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation à l'instant $t = 3637$ s, de h (a), θ (b), des composantes sur X et Y du vecteur $\vec{q}$ (c) et (d) sur l'ensemble du domaine (Scénario de référence).

b. Visualisation des profils hydrologiques

Une autre façon d'appréhender l'évolution des paramètres variables consiste à regarder leur valeur le long d'une coupe verticale (Figure 3.14). La commande ELEVATION(x) FROM (a) TO (b) est utilisée dans le modèle pour tracer des profils, de teneur en eau, de pression interstitielle ou de charge hydraulique sur des coupes, dont le nombre et la position sont définis par l'utilisateur au moment de la description de la géométrie. Ces profils ont plusieurs intérêts, comme le suivi du front d'infiltration ou la visualisation du gradient de charge hydraulique.

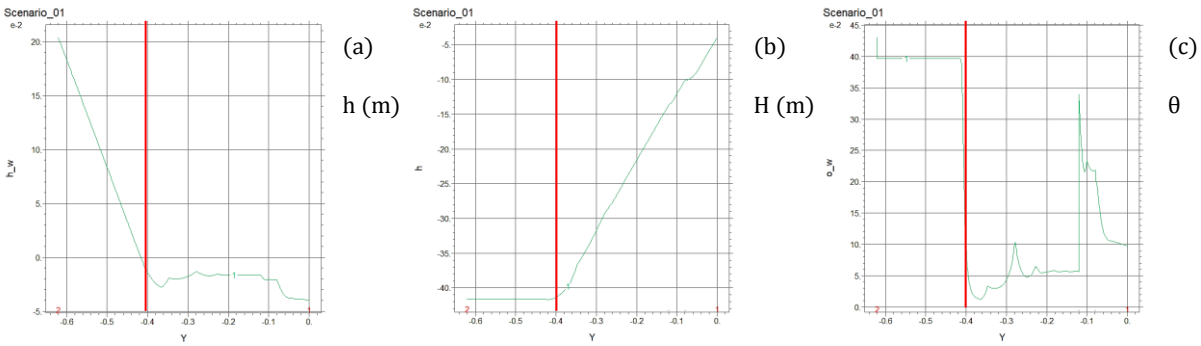


Figure 3.14 – Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation des profils de h (a), H (b) et θ (c), sur la coupe 1 à l'instant $t = 10800$ s (Scénario de référence). Les lignes rouges représentent la hauteur de surface libre dans la fondation.

Ces profils sont notamment utilisés dans l'analyse des résultats pour déterminer des hauteurs précises, comme sur les figures ci-dessus la hauteur de stockage d'eau, ou des ruptures de pentes sur le profil de charge hydraulique.

c. *Visualisation en fonction du temps*

Il s'agit ici de tracer l'évolution des paramètres variables en fonction du temps. La commande HISTORY(x) AT (X_1,Y_1)(X_2,Y_2)(…) est utilisée pour tracer l'évolution de h, θ, K, et de la composante Y du vecteur $\vec{q}$ à différentes profondeurs (correspondant à chacune des couches) le long des différentes coupes (Figure 3.15).

Ces visualisations font la transition entre les sorties purement descriptives et les sorties quantitatives. D'une part, elles sont utilisées pour suivre et mieux comprendre les processus hydrologiques dans la structure, notamment les évolutions relatives de h et de θ. D'autre part, ces graphiques permettent de quantifier différents indicateurs : la hauteur maximum de stockage atteinte (graphique de h), la vitesse de filtration maximum (graphique de la composante en Y du vecteur $\vec{q}$), et le décalage temporel entre le début de la pluie et le moment ou le front d'infiltration atteint les différentes couches (graphique de h et de θ).

À noter que les valeurs tracées sont automatiquement exportées dans un fichier par graphique ce qui permet un traitement ultérieur des données.

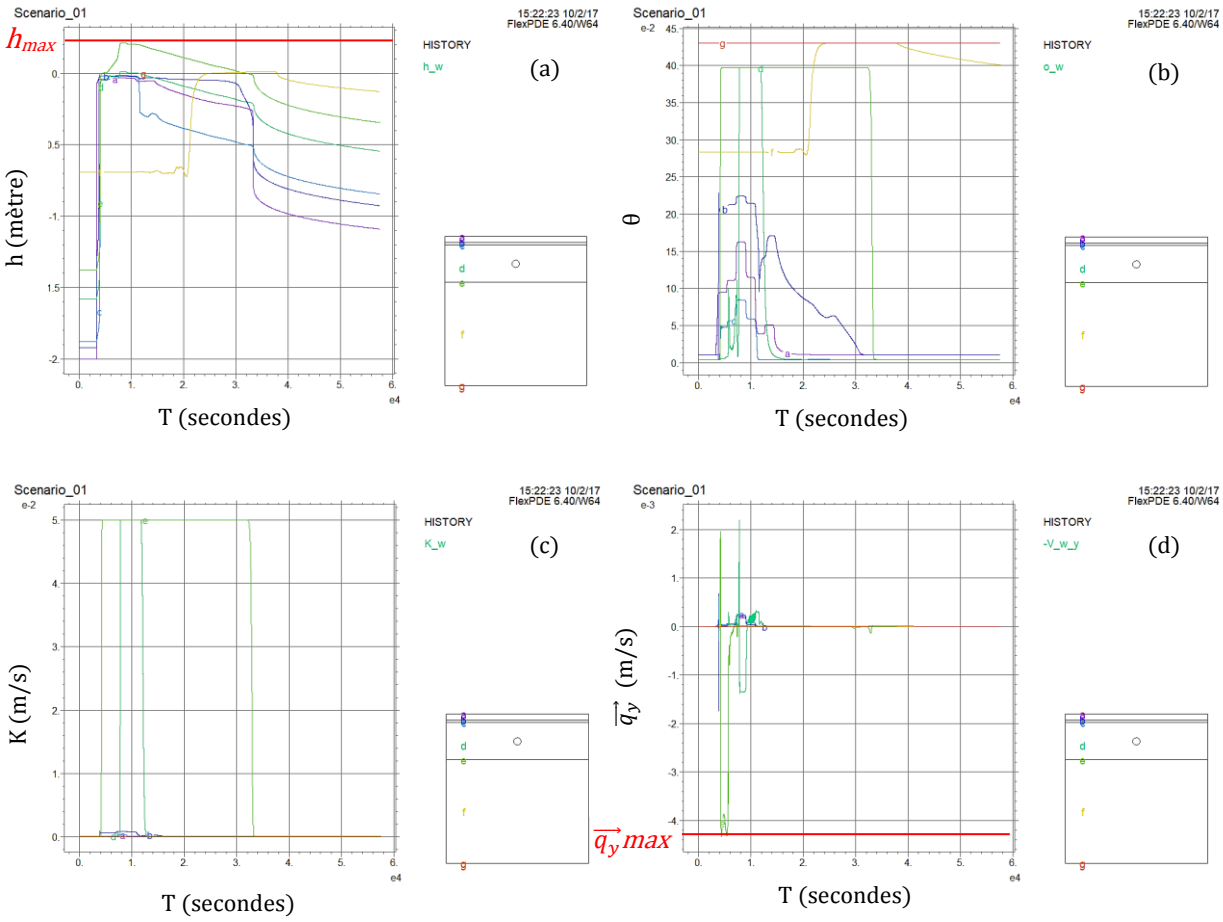


Figure 3.15 - Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation des variations de h (a), θ (b), K (c) et $\overrightarrow{q_y}$ (d) en fonction du temps le long de la coupe 1 (Scénario de référence). Représentation de h_{max} et de $\overrightarrow{q_y}$ maximum.

3.1.3.2 SORTIES QUANTITATIVES – DÉFINITION DES INDICATEURS

Afin de répondre à l'objectif de ce travail de modélisation, il est nécessaire de définir des indicateurs pour quantifier le comportement hydrologique de la structure dans différents scénarios (différentes valeurs de paramètres d'entrée). Les indicateurs retenus peuvent être organisés en quatre catégories : les processus hydrologiques, le stockage dans la structure, les décalages temporels et des indicateurs de contrôle. Ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 – Liste des indicateurs utilisés pour quantifier les résultats des simulations du modèle *PermetAble*.

Indicateurs	Notations	Catégorie - utilisation
% évaporé	*Vs_Evap*	Processus hydrologiques. *Indicateurs de référence pour quantifier les performances de la structure.*
% infiltré	*Vs_Inf*	
% drainé	*Vs_Drain*	
% stocké	*V_Stock_fin*	
Stockage maximum : Structure	*V_Stock_max*	Stockage dans la structure. *Utilisés pour étudier le rôle de chaque couche et la capacité de stockage de la structure.*
Couche de surface	*V_Pave_max*	
Lit de pose	*V_Lit_max*	
Fondation	*V_Fond_max*	
Retard du pic de stockage	*DT_Pic_Stock*	Décalage temporel. *Utilisés pour quantifier l'effet temporisateur de la structure.*
Retard du pic du drain	*DT_Pic_Drain*	
Hauteur maximum de stockage libre	*h_max*	Indicateurs de contrôle. *Utilisés pour vérifier si les résultats sont conformes aux hypothèses de modélisation ou de dimensionnement.*
Vitesse de filtration verticale maximum	*Vw_y_max*	
Débit de drainage maximum	*Qs_Drain_max*	

a. Processus hydrologiques

Résultats principaux du modèle, il s'agit ici de quantifier comment se répartit le volume entrée dans la structure entre les différents processus hydrologiques d'évacuation de l'eau. Le débit cumulé (volume total) est calculé pour chaque processus (infiltration, évaporation, drainage et stockage) tout au long de la simulation. La valeur finale est rapportée au volume total d'eau entré pour donner un pourcentage qui est utilisé comme indicateur. L'utilisation de ce pourcentage facilite la comparaison entre des scénarios avec un volume total en entrée différent.

Deux méthodes de calcul sont utilisées pour obtenir les débits cumulés. La première méthode consiste à calculer chaque débit instantané par intégration de la composante normale de la vitesse de filtration le long du contour concerné. L'Équation 3.8 présente ce calcul dans le cas du débit drainé.

Équation 3.8 – Q_{s_drain}

$$Q_{s\_drain} = \oint_{drain} \vec{n} \cdot (-K(h) \times \overrightarrow{grad}(h+z)) \cdot dl$$

Ensuite, le débit cumulé est obtenu par intégration du débit instantané en fonction du temps, comme illustré par l'extrait de code suivant pour le calcul du débit et volume drainé.

```
! DRAIN OUTFLOW
        Outflow_drain = ABS(LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Drain', 'Foundation'))
        Total_Outflow_drain = TINTEGRAL(Outflow_drain)
```

Cette méthode est satisfaisante pour le calcul des débits sur les frontières extérieures du domaine de résolution, mais elle s'est révélée moins fiable pour les calculs de débits entre chaque couche de la structure. En effet, les valeurs de $\vec{q}$ calculées par FlexPDE oscillent parfois autour de la valeur de convergence et peuvent prendre ponctuellement des valeurs extrêmes. Ces valeurs extrêmes conduisent parfois à une estimation faussée du débit instantané mais n'impactent pas significativement la valeur du débit cumulé.

Pour pallier cette limite de FlexPDE une seconde méthode est utilisée. Elle consiste à calculer l'intégrale de la variation de teneur en eau pour chaque couche du domaine de résolution ; surface, lit de pose, fondation et sol (Équation 3.9), puis à calculer les débits cumulés d'une couche à l'autre en utilisant l'équation de conservation des volumes (Équation 3.10). L'intégration en surface (et non plus linéaire), portant sur θ (et non plus sur $\vec{q}$), permet de réduire les imprécisions de calcul (Équation 3.9). Cette méthode nécessite néanmoins de connaître le débit cumulé entrant et les débits cumulés sortant du domaine de résolution *via* le drain et l'évaporation. Ces débits sont obtenus par la première méthode (Équation 3.8).

Équation 3.9 - V_{stock}

$$V_{stock_{surface}}(t) = \iint_{Surface} \theta(t) \cdot \mathrm{dS} - \iint_{Surface} \theta(t_0) \cdot \mathrm{dS}$$

Équation 3.10 - V_{s_Inf}

$$V_{s_{Inf}}(t) = \int_0^t Q_{s_{Inf}} \cdot dt = \int_0^t Q_e \cdot dt - \left[V_{stock_{surf}}(t) + V_{stock_{Lit}}(t) + V_{stock_{Fond}}(t)\right] - \int_0^t Q_{s\_drain} \cdot dt$$

Enfin, pour vérifier la part d'erreur éventuelle liée au calcul du débit entrant, la valeur obtenue par intégration est systématiquement comparée à la valeur théorique (déduite des paramètres d'entrée de pluie et de ruissellement). Lors de la simulation, l'évolution des débits cumulés en fonction du temps est affichée (Figure 3.16) et les valeurs sont exportées au format de tableur.

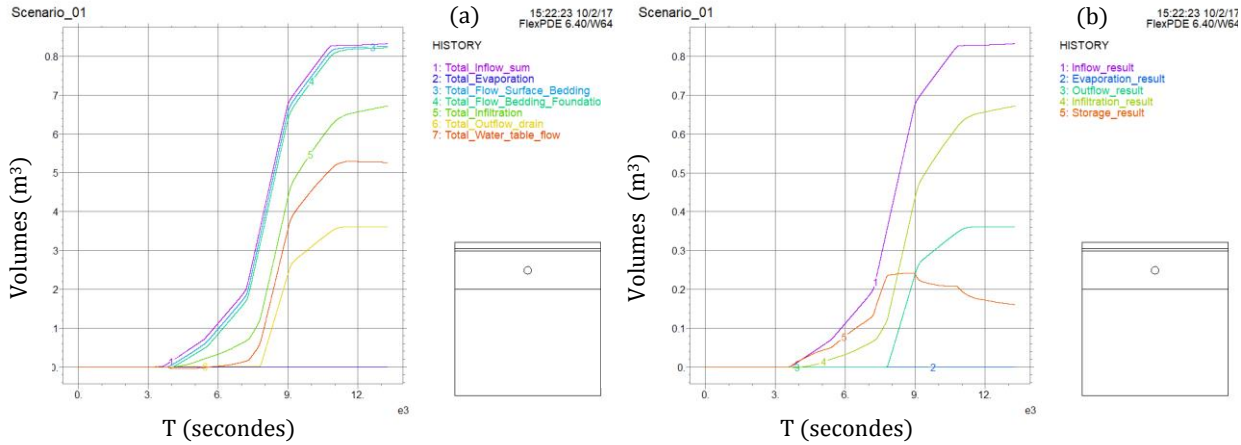


Figure 3.16 – Sorties du modèle *PermetAble*. Évolution des volumes en entrée et sortie de chaque couche (a), et des indicateurs hydrologiques (b) (Scénario de référence).

b. *Stockage dans la structure*

Le stockage résiduel dans la structure à la fin de la simulation (après la durée de drainage) est généralement égal à zéro. Cet indicateur ne permet pas de donner des informations sur les capacités de stockage de la structure. Pour évaluer cet aspect, un indicateur de stockage maximum est utilisé pour la structure dans son ensemble d'une part, et pour chaque couche d'autre part, afin de quantifier leur contribution respective.

Lors de l'initialisation d'une simulation, le volume d'eau de chaque couche est calculé par intégration de la teneur en eau au temps $t = 0$. Ces valeurs sont utilisées pour fixer les valeurs de volume d'eau initial. Le volume stocké dans chaque couche est ensuite calculé selon l'Équation 3.9 à chaque pas de temps de la simulation. Ces valeurs sont tracées (Figure 3.17) et exportées ce qui permet de déterminer la valeur de stockage maximum pour chacune des couches et pour la structure.

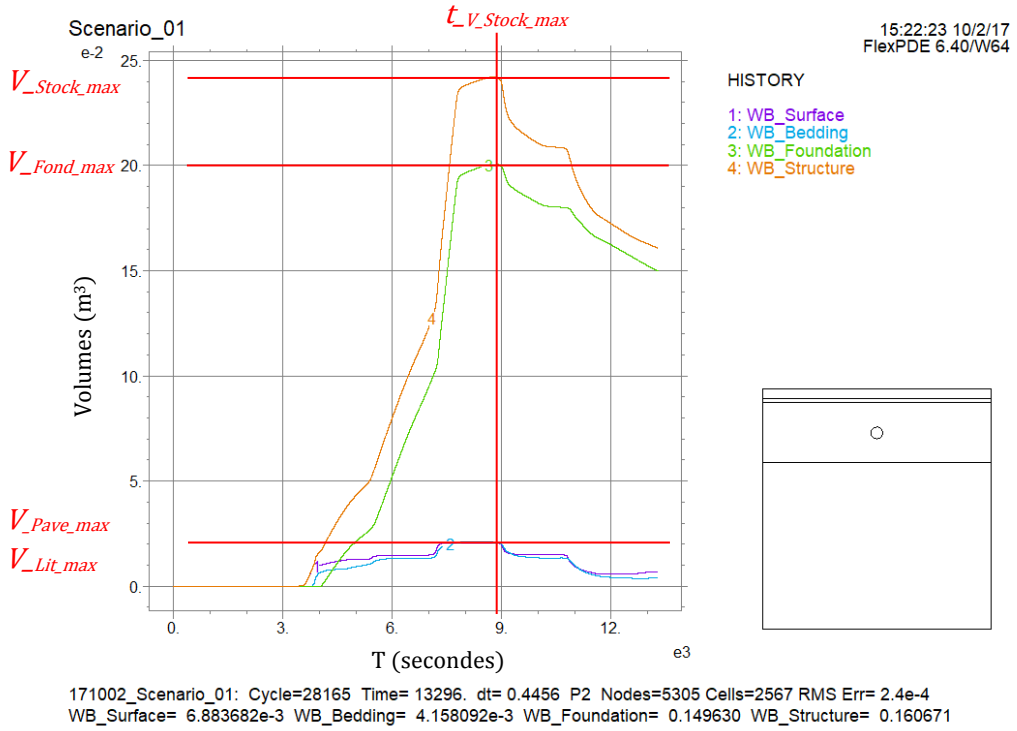


Figure 3.17 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution du volume stocké dans chaque couche et dans la structure en fonction du temps (Scénario de référence). Identification des volumes maximum.

c. *Décalages temporels*

L'intérêt premier des structures à revêtements perméables est de réduire la proportion d'eau ruisselée et drainée en favorisant l'infiltration et l'évaporation. Cependant un drain reste parfois nécessaire pour assurer l'évacuation d'une partie de l'eau. Un autre indicateur intervient alors, il s'agit de la capacité de la structure à ralentir les écoulements. Cet effet de temporisation permet d'éviter la concentration trop importante des volumes drainés et donc la saturation des réseaux. Pour quantifier cet aspect, deux indicateurs sont utilisés : le décalage temporel du pic de stockage et le décalage temporel du pic de drainage par rapport au pic de pluie[17]. Ces deux

[17] D'autres indicateurs temporels ont été étudiés comme le décalage entre le début de la pluie et le début du drainage, et celui entre la fin de la pluie et la fin du drainage. Ils ne sont pas valorisés dans ce document pour limiter l'étendue de l'analyse.

indicateurs ont été retenus en raison de la simplicité et de la robustesse de leur détermination. Ils sont calculés en déterminant graphiquement (ou par post traitement des données) la valeur de t pour laquelle le débit de drainage ou le stockage sont maximum (Figure 3.6 et Figure 3.17).

Les deux valeurs peuvent être proches si le stockage a majoritairement lieu dans la couche de fondation (puisque le débit de drainage maximum a lieu, pour la hauteur d'eau maximum, dans la structure). L'indicateur de décalage du pic de stockage est néanmoins conservé pour permettre une comparaison entre toutes les simulations, même celles présentant aucun drainage.

d. Indicateurs de contrôle

Cette dernière catégorie d'indicateurs vise principalement à vérifier la validité de certaines hypothèses de modélisation. En effet, la Figure 3.2 souligne l'importance de la vérification des hypothèses de modélisation pour interpréter les résultats. Dans le cadre de ce modèle l'hypothèse la plus sensible concerne celle d'une vitesse de filtration suffisamment faible pour permettre de négliger le potentiel d'énergie cinétique.

Comme cela est précisé dans l'annexe A, le nombre de REYNOLDS peut être utilisé pour vérifier si les débits observés restent dans le domaine de validité de la loi de DARCY ($Re < 1$). En milieu poreux ce nombre s'exprime par la relation suivante (Équation 3.11) (Chossat, 2005).

Équation 3.11- *Re*

$$Re = \frac{\vec{q} \cdot d}{\nu}$$

Compte tenu des valeurs respectives de d (la dimension moyenne de taille des pores) déterminée pour chaque matériau (Section 2.1) et de la valeur de ν ($\nu = 1{,}007 \times 10^{-6}$ m²·s^{-1} à 20°C) la condition $Re < 1$ revient à dire que $\vec{q}$ doit être inférieur aux valeurs présentées dans le Tableau 3.4 pour chaque matériau.

Tableau 3.4 - Valeur de vitesse de filtration maximum pour les différents matériaux, calculée en fonction de leur diamètre de pore moyen.

	d_{moyen} (m)	$\vec{q}_{max}$ (m/s)
Béton	$2{,}7 \cdot 10^{-3}$	$3{,}73 \cdot 10^{-4}$
Gravillon	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}52 \cdot 10^{-4}$
Graviers	$1{,}0 \cdot 10^{-2}$	$1{,}01 \cdot 10^{-4}$
Sable	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}01 \cdot 10^{-3}$
Limon	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$	$3{,}87 \cdot 10^{-2}$
Argile	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$	$5{,}04 \cdot 10^{-1}$

Au regard de ces valeurs, l'hypothèse concernant l'énergie cinétique ne posera pas de problème pour le limon et l'argile. Elle peut être sensible pour le sable où une vérification sera réalisée avec comme critère $\vec{q}_{max} < 1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Surtout, cette hypothèse nécessite une vérification systématique pour l'ensemble des matériaux de la structure compte tenu de leur forte perméabilité saturée. Cette vérification est basée sur le critère $\vec{q}_{max} < 1 \cdot 10^{-4}$ m/s. La valeur de $\vec{q}_{max}$ est obtenue à partir des sorties du modèle (Figure 3.15).

Enfin, les indicateurs h_{max} et $Q_{s\_drain\_max}$ sont utilisés pour vérifier la pertinence du dimensionnement. En effet, si h_{max} est supérieur à une certaine hauteur, cela peut poser des problèmes structurels (*a fortiori* si h_{max} est supérieure à la hauteur de la structure,

débordement). Dans le cadre de ce travail, la valeur limite pour h_{max} est fixée à 50 % de la couche de fondation. Au-delà il est considéré que le dimensionnement n'est pas adapté.

Concernant $Q_{s\_drain\_max}$, aucun critère seuil n'est utilisé mais cette valeur est observée pour s'assurer que le débit reste réaliste au regard de ce qu'un réseau d'eau pluviale peut absorber.

SECTION 3.2

3.2 CALAGE ET VÉRIFICATION DU MODÈLE *PERMETABLE*

Comme présenté dans la section 1.3, la construction du modèle *PermetAble* repose en quasi intégralité sur des grandeurs qui ont une réalité physique et sont physiquement mesurables. La détermination expérimentale ou *via* la littérature des valeurs de la quasi-totalité des paramètres d'entrée utilisés, constitue ce qui est appelé ici le calage « physique » du modèle. Cette étape clé du développement du modèle (des deux modèles) fait l'objet d'un chapitre dédié (Chapitre 2). La détermination des paramètres d'entrée plus spécifiques aux matériaux et à la structure du modèle *PermetAble* est notamment développée à la section 2.1.

Néanmoins, certaines grandeurs n'ont pas pu être déterminées physiquement, aussi un calage « expérimental » est nécessaire (3.2.1). Puis le modèle ainsi calé est validé par la confrontation à d'autres données expérimentales (3.2.2). À noter que les données expérimentales utilisées pour le calage et la vérification ont été obtenues en laboratoire, *via* un banc d'essai, présentés dans la section 2.2.

3.2.1 CALAGE « EXPÉRIMENTAL » DU MODÈLE

Comme cela a été précisé lors de la présentation du modèle, deux paramètres d'entrée n'ont pas pu être déterminés précisément lors du calage « physique ». Il s'agit de la perméabilité minimum et du coefficient d'orifice du drain. Cette étape vise à ajuster les valeurs retenues pour ces deux paramètres en confrontant les résultats du modèle à ceux d'une expérience sur banc d'essai. Etant donné que les deux paramètres en question portent sur l'écoulement dans la structure et le débit de sortie par le drain un essai sans infiltration avec un drain situé au fond de la structure a été réalisé. Les résultats de cet essai sont présentés dans la section 2.2.

3.2.1.1 PRÉSENTATION DE LA MODÉLISATION DE L'ESSAI

La structure du banc d'essai a été représentée dans le modèle avec une géométrie de 70 cm de large, une couche de pavés de 8 cm, un lit de pose de 4 cm et une couche de fondation de 41 cm. La base du drain est située à 5 mm du fond de la structure. Aucune infiltration n'est permise, la couche de sol n'est donc pas simulée et la condition aux limites du fond de la structure est une condition de flux nul. La durée de drainage après la fin de la pluie est de 3 heures et la pluie simulée correspond à celle utilisée lors de l'essai de calage présenté en section 2.2.

Les données expérimentales (débits en entrée, débits de sortie et stockage) sont importées dans le modèle qui calcule à chaque pas de temps l'écart entre mesuré et simulé.

Une première valeur *a priori* a été donnée aux paramètres étudiés, K_{min} et CO_{drain}.

- CO_{drain}= 0,6 (coefficient généralement utilisé pour les orifices circulaires).
- $K_{min} = K_s \cdot 10^{-3}$, soit respectivement $1 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-6}$, et $5 \cdot 10^{-5}$ m/s pour le béton drainant (couche de surface), les gravillons (lit de pose et les graviers (fondation).

3.2.1.2 CALAGE DU COEFFICIENT D'ORIFICE

Le coefficient d'orifice (CO_{drain}) est compris entre 0 et 1, et permet de rendre compte de la section réellement efficace pour l'écoulement de l'eau au travers d'une ouverture. Dans le modèle, l'utilisation de l'équation dite d'orifice (Équation 3.6) est une hypothèse prise pour représenter l'écoulement vers le drain. Il s'agit d'un choix *a priori* pour traduire la relation entre h et le débit drainé. Compte tenu des lois hydrauliques, cette relation est de la forme : $Q_{drain} = A \cdot \sqrt{2gh}$. Le calage du coefficient d'orifice revient donc dans les faits à fixer la valeur de A.

L'essai réalisé ne comportant pas d'infiltration, le débit sortant par le drain est exactement égal au débit entrant une fois le régime permanent atteint, soit 0,39 L/min. Lors de la phase de calage, des valeurs de CO_{drain} ont été testées entre 0,6 et 1 (0,6 ; 0,8 ; 0,9 et 1). Une variation de CO_{drain} doit logiquement conduire à une variation de la hauteur d'eau au-dessus de la base du drain (noté h_{drain}) pour équilibrer le débit drainé et le débit entrant. En fonction de la valeur de CO_{drain} utilisée, la hauteur d'eau h_{drain} varie entre 5 et 4 mm (Figure 3.18).

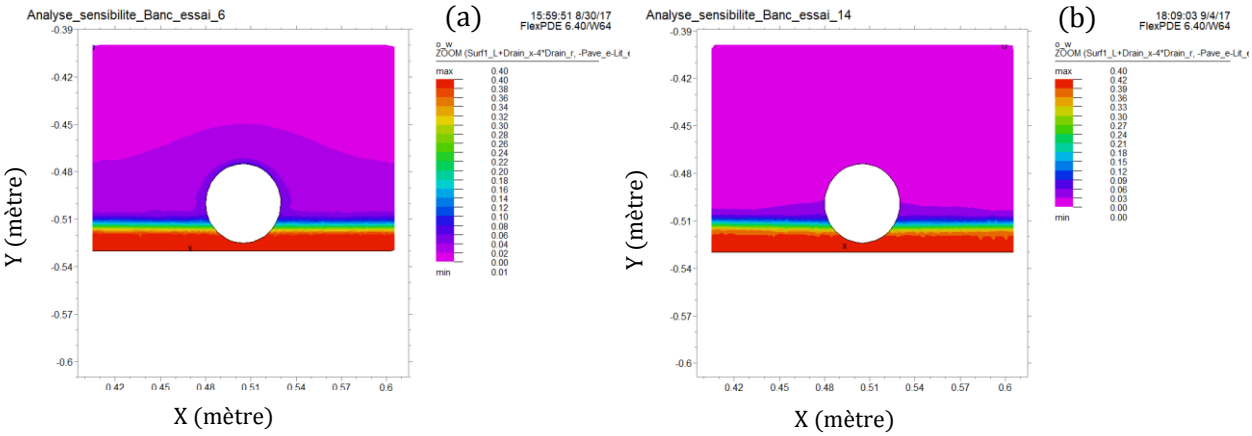


Figure 3.18 - Sortie du Modèle *PermetAble*. Visualisation de la teneur en eau sur l'ensemble du domaine pendant le régime permanent. Essai de calage n°6, $CO_{drain} = 0{,}6$ (a) et essai de calage n°14, $CO_{drain} = 1$ (b).

Concrètement, la variation du paramètre CO_{drain} entre 0,6 et 1 n'entraîne aucune variation du débit et volume total drainés, mais s'accompagne d'une très légère variation de la hauteur maximum atteinte (environ 1 mm d'écart maximum). Compte tenu du fait que l'erreur admise pour la résolution numérique est de 1 mm cette variation de hauteur d'eau n'est pas significative. Aussi, il apparaît que la valeur de CO_{drain} n'a pas d'influence notable sur le modèle quand elle reste comprise entre 0,6 et 1. La valeur *a priori* de 0,6 est conservée par défaut pour la suite.

3.2.1.3 CALAGE DU COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ MINIMUM

Le calage des valeurs de K_{min} pour les matériaux de la structure a été conduit en trois étapes.

1. Les valeurs des trois K_{min} ont été ajustées progressivement en partant des valeurs prises *a priori* et en observant les effets de chaque modification. Ces observations et ajustements s'appuient notamment sur les indicateurs de décalage temporel définis lors de la présentation de l'essai expérimental (2.2.3).

   Concrètement cette première étape a consisté à tester différentes valeur de K_{min} pour chaque matériau et à ajuster progressivement leur valeur.

2. Pour approfondir l'impact du coefficient de perméabilité minimum sur les résultats obtenus pour chaque simulation une analyse par régression linéaire multiple a été conduite entre les trois K_{min} (variables explicatives) et les indicateurs de débits drainés cumulés, de stockage maximum et de stockage final (variables descriptives). Cette seconde étape a permis d'approfondir la compréhension de l'influence de ces coefficients sur les résultats.

3. Enfin, en s'appuyant sur les observations et les analyses précédentes, la troisième étape a consisté à définir la valeur de chacun des paramètres qui permet de faire correspondre le mieux les résultats de la simulation avec ceux de l'essai expérimental.

a. Ajustements progressifs de K_{min}

Les ajustements et observations successifs sont résumés sur la figure 3.19.

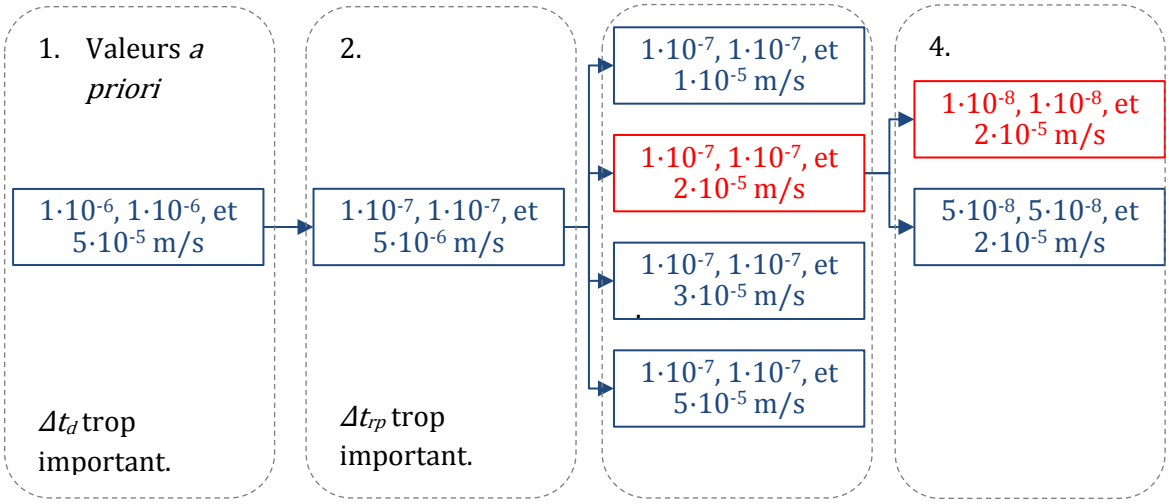


Figure 3.19 – Schéma des ajustements progressifs des valeurs de K_{min}. Les valeurs sont données dans l'ordre : béton drainant, gravillons, graviers.

1. Les valeurs *a priori* de K_{min} ne permettent pas de rendre compte de la dynamique de l'essai, notamment le temps de drainage après la fin de la pluie, Δt_d, où l'eau retenue dans la structure percole trop rapidement vers le drain. Pour corriger cette observation, le premier ajustement a consisté à diminuer d'un facteur 10 les trois paramètres.

2. La dynamique n'est alors toujours pas respectée mais dans le sens inverse. Cette fois-ci l'eau ne s'infiltre pas suffisamment rapidement dans la structure entraînant un début du régime permanent, Δt_{rp}, au bout de 49 minutes au lieu de 38 minutes. À l'aide des différentes sorties du modèle, il apparaît ici que c'est la couche de fondation qui ralentit trop l'écoulement au regard de ce qui se passe dans l'essai expérimental. Le deuxième ajustement consiste alors à faire varier la valeur de K_{min} pour la couche de fondation (valeurs testées : $1{\cdot}10^{-5}$; $2{\cdot}10^{-5}$; $3{\cdot}10^{-5}$; $5{\cdot}10^{-5}$ m/s).

3. La valeur $K_{min} = 2{\cdot}10^{-5}$ m/s pour la couche de fondation donne les meilleurs résultats et permet d'améliorer la cohérence entre la dynamique de l'essai simulé et expérimental. Un autre indicateur est alors utilisé, il s'agit du volume stocké au moment de l'inflexion du drainage (Δt_i). Avec les valeurs précédentes, ce volume n'est que de 4,5 litres en moyenne alors que, lors de l'essai expérimental, un volume de 6,6 litres était mesuré. Le troisième ajustement a alors consisté à faire varier la valeur de K_{min} pour la couche de surface et le lit de pose (valeurs testées : $1{\cdot}10^{-8}$; $5{\cdot}10^{-8}$ m/s).

4. La diminution des valeurs de perméabilité minimum pour ces deux couches renforce leur potentiel de rétention d'eau et ralentit la vidange de la structure. La valeur $K_{min} = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s pour ces deux paramètres donne alors la meilleure corrélation entre les résultats simulés et expérimentaux.

b. Analyse par régression linéaire multiple

Pour explorer plus en détail les corrélations entre les paramètres et les résultats, la méthode de traitement de données par régression linéaire multiple a été utilisée lors du post-traitement des résultats. Cette méthode construit une modélisation des résultats (variables descriptives) à partir des valeurs des paramètres utilisés (variables explicatives) sous la forme suivante.

Équation 3.12 - Régression linéaire multiple

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \beta_2 \cdot x_{i2} + \cdots + \varepsilon_i$$

Avec Y_i la variable descriptive étudiée pour l'observation 'i', x_{i1} la valeur de variable explicative n°1 correspondant à l'observation 'i', β_0 la valeur moyenne de la variable descriptive, β_1 le coefficient directeur de la variable explicative x_1 et enfin ε_i le résidu aléatoire de l'observation 'i'.

L'objectif de cette approche est d'expliquer une variable quantitative à partir d'un ensemble de variables explicatives. Les coefficients β sont recherchés par la méthode des moindres carrés de façon à minimiser l'écart entre les prédictions du modèle et les valeurs réelles. Différents indicateurs permettent ensuite d'analyser et d'exploiter les résultats de la régression linéaire multiple :

- R^2 : le coefficient de détermination (varie entre 0 et 1). R^2 représente le pourcentage de variabilité de la variable descriptive qui est expliqué par la variable explicative étudiée ;
- p_c : la probabilité critique correspondant au test de FISHER (Pr > F). Cette valeur correspond à la probabilité d'avoir la même valeur de R^2 sous le seul effet du hasard.

Cette méthode a été utilisée ici pour étudier l'influence des valeurs de perméabilité minimum sur le volume total drainé, le stockage maximum et le stockage à la fin de la simulation. La Figure 3.20 montre les coefficients normalisés pour chaque paramètre.

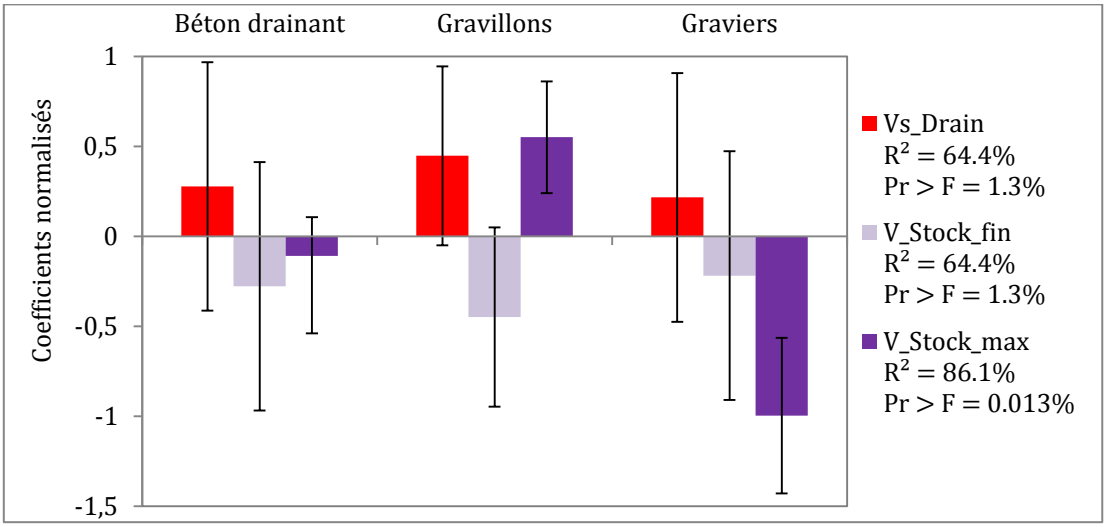


Figure 3.20 – Résultat de l'analyse par régression linéaire multiple portant sur l'influence de K_{min}. Affichage de la valeur des coefficients normalisés pour chaque paramètre et pour chaque indicateur. La barre d'erreur correspond à l'intervalle de confiance à 95 %.

Si la barre d'erreur (intervalle de confiance à 95 %) s'étend de part et d'autre de l'axe des abscisses, alors la variable explicative en question n'a pas d'influence notable sur la variable descriptive étudiée (au regard des données fournies). Dans le cas contraire, une influence de la variable explicative peut être mise en évidence.

Les résultats présentés sur la Figure 3.20 ne permettent pas de mettre en évidence une influence notable des valeurs de K_{min} pour le volume drainé et le stockage à la fin de la simulation. Ces deux indicateurs étant liés (Volume entrant = Volume drainé + Stockage), il est normal qu'ils présentent des statistiques (R^2 et Pr > F) identiques, et des coefficients normalisés corrélés. Il peut cependant être souligné que la valeur K_{min} des gravillons semble avoir la plus grande influence sur ces indicateurs et qu'augmenter la valeur de K_{min} *(gravillons)* a de forte chance de favoriser le drainage plus que le stockage. Cette tendance peut s'expliquer par le fait qu'une augmentation de K_{min} *(gravillons)* va « artificiellement » réduire l'effet de ralentissement et de rétention dans le transfert de l'eau depuis les pavés vers la fondation. Cette accélération de l'écoulement entraîne un drainage plus rapide de la structure donc diminue le stockage final.

Les résultats concernant le stockage maximum montrent une influence plus marquée de K_{min}, avec une influence négative significative pour les graviers (fondation) et une influence positive des gravillons (lit de pose). Pour interpréter ces observations, il faut noter que le maximum de stockage est atteint juste avant la fin de la pluie, quand le bas de la structure est déjà saturé et que le maximum d'eau est en train de s'écouler dans la couche de graviers (Figure 3.21).

L'influence de K_{min} *(gravier)* s'explique par le ralentissement de l'écoulement dans la couche de fondation. L'eau met alors plus de temps à rejoindre le drain ce qui contribue à augmenter la part du stockage par rétention. L'influence de K_{min} *(gravillons)* quant à elle, s'explique par une augmentation du transfert de l'eau vers la couche de fondation, ce qui conduit à une mise en charge du drain plus rapide et donc une durée plus longue pour l'accumulation de l'eau par rétention dans la couche de fondation.

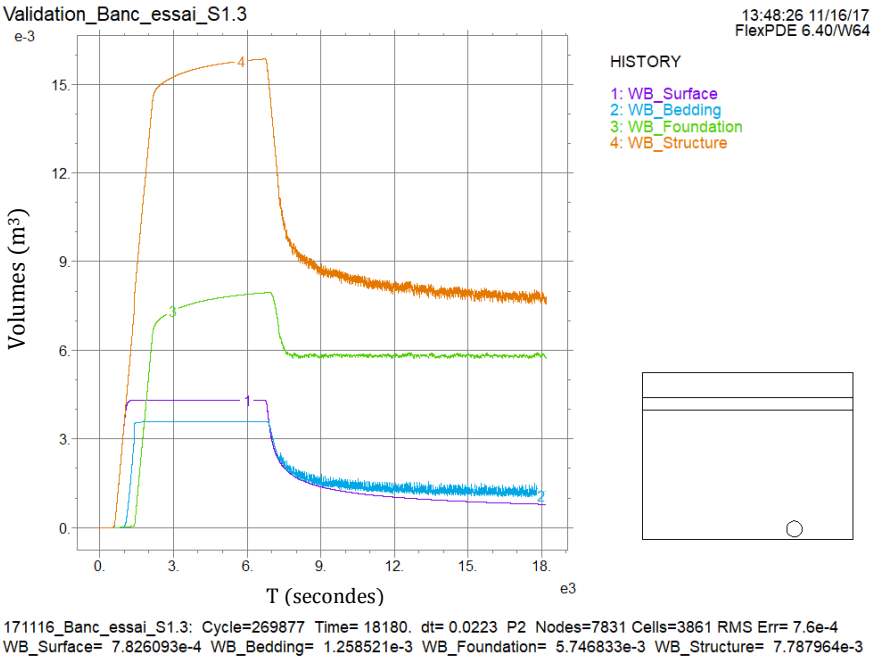


Figure 3.21 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution du stockage dans la structure au cours du temps (simulation de calage optimisée).

c. *Définition des valeurs de K_{min}*

Les observations et l'analyse précédentes ont permis de mieux appréhender le rôle du paramètre K_{min}. Il convient de rappeler que ce paramètre n'a pas de réalité physique mais constitue une hypothèse de modélisation pour faciliter la résolution mathématique du modèle. Tout l'enjeu est donc de fixer une valeur qui facilite la modélisation tout en modifiant au minimum le comportement hydrologique. La comparaison des résultats des différentes simulations avec les données expérimentales a permis de déterminer les valeurs des paramètres les plus appropriés : $K_{min} = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s (béton) ; $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (gravillons) et $2 \cdot 10^{-5}$ m/s (graviers). Les résultats simulés avec ces paramètres sont représentés sur la Figure 3.22, comparés avec les données expérimentales.

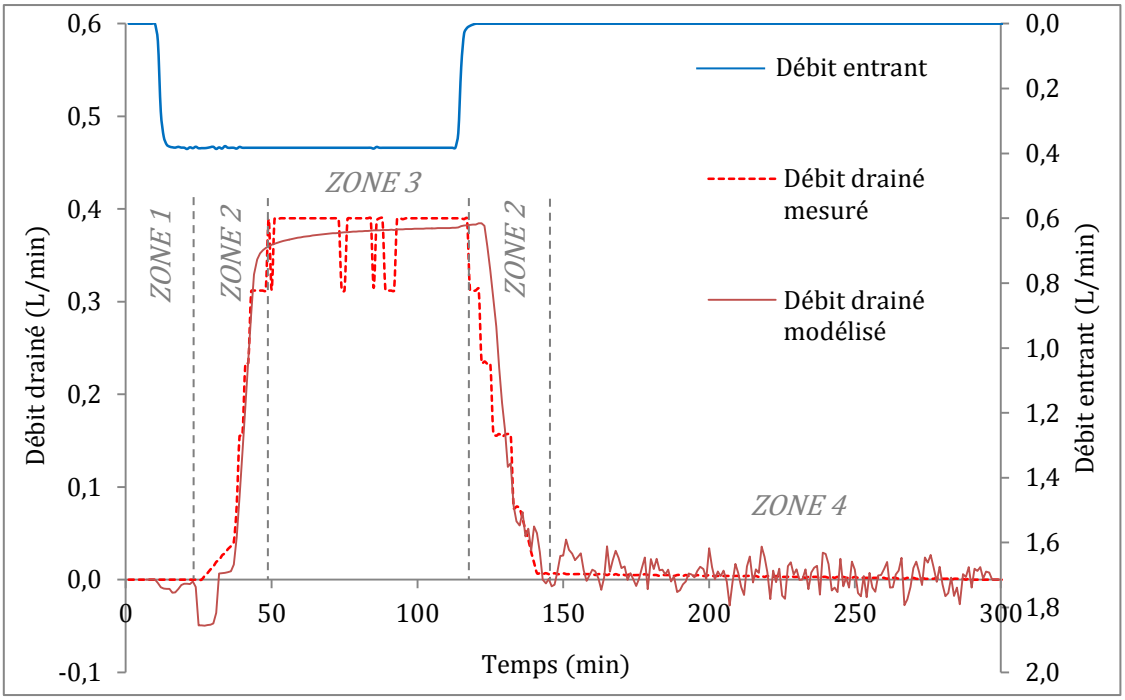


Figure 3.22 – Comparaison entre les hydrographes des débits drainés mesurés et simulés (échelle de gauche) et représentation de l'hydrographe du débit en entrée (échelle de droite) (essai de calage du modèle *PermetAble*)

Quatre zones distinctes peuvent être identifiées sur la Figure 3.22 :

- la première, au début du drainage, présente un débit drainé simulé avec des valeurs négatives (ce qui est impossible en réalité), elle est due à une surestimation de la teneur en eau dans la structure par le modèle à l'initialisation du front d'infiltration ;
- la seconde zone correspond aux deux périodes de transition, au début et à la fin du drainage. Sur ces deux phases, le modèle reproduit bien la dynamique temporelle et le débit mesuré, avec un léger retard à la fin de la pluie ;
- la troisième zone correspond à la phase de régime permanent, les résultats simulés présentent une légère sous-estimation du débit, avec une lente montée en charge qui ne se retrouve pas dans les résultats expérimentaux ;
- enfin, la quatrième zone correspond à la fin du drainage, quand le débit est proche de zéro et draine au goutte-à-goutte l'eau qui percole dans la structure. Sur cette dernière partie, la simulation donne des valeurs de débits qui oscillent autour de la valeur mesurée. Ce résultat est dû à la configuration de la simulation. En effet, l'absence d'infiltration entraîne un état

d'équilibre instable lors de la fin du drainage avec un niveau d'eau stabilisé juste au niveau bas du drain. La simulation numérique alterne alors entre drainage et absence de drainage. Ces oscillations n'ont pas lieu quand l'infiltration est permise.

Pour illustrer la corrélation entre les résultats mesurés et simulés, la Figure 3.23 présente les valeurs de débits drainés simulés et mesurés pour chaque point. La bissectrice (y = x) représente la corrélation exacte entre valeurs simulées et mesurées. L'enveloppe tracée sur la figure représente l'intervalle de confiance à 95 %. Les points proches de l'origine représentent le début et la fin du drainage où les valeurs simulées oscillent autour des valeurs mesurées. Les points correspondants aux débits élevés (régime permanent) présentent une relativement bonne corrélation entre les valeurs simulées et mesurées. Dans l'ensemble, la simulation donne une représentation fidèle de l'expérience avec une valeur de corrélation entre les points mesurés et simulés, $R^2 = 0{,}971$.

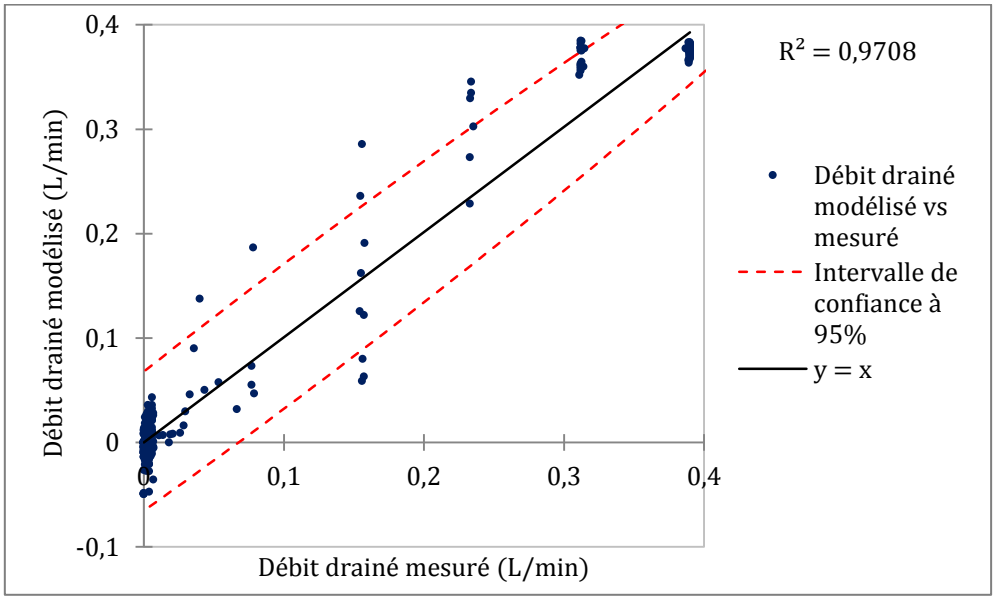


Figure 3.23 –Représentation des valeurs de débit drainé modélisé en fonction des valeurs de débit drainé mesuré (essai de calage du modèle *PermetAble*)

Pour terminer, l'indice dit de NASH-SUTCLIFFE (NSE) est calculé pour évaluer la corrélation entre les valeurs simulées et mesurées. Cet indice est couramment utilisé en hydrologie pour comparer des hydrographes (Nash et Sutcliffe, 1970), il se calcule suivant l'Équation 3.13.

Équation 3.13 - NSE

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{T}\left(Q_i^{obs} - Q_i^{mod}\right)^2}{\sum_{i=1}^{T}\left(Q_i^{obs} - Q_{moy}^{obs}\right)^2}\right]$$

Avec, Q_i^{obs} la i^{ème} valeur mesurée, Q_i^{mod} la i^{ème} valeur modélisée et Q_{moy}^{obs} la moyenne des valeurs mesurées. Cet indicateur prend des valeurs comprises entre -∞ et 1. Il vaut 1 en cas de corrélation parfaite. Généralement, une valeur de NSE comprise entre 0,75 et 1 indique une très bonne corrélation entre les hydrographes et par conséquent un calage satifaisant du modèle (Moriasi et al., 2007). Dans le cas présent, cet indice calculé entre les valeurs simulées et mesurées donne un NSE = 0,967 ce qui confirme la pertinence des valeurs de K_{min} utilisées.

3.2.2 VÉRIFICATION « EXPÉRIMENTALE » DU MODÈLE

Le modèle a été calé dans des conditions particulières, absence d'infiltration, et avec un seul événement pluvieux. Il convient de vérifier les résultats du modèle dans d'autres conditions pluviométriques et une autre configuration de structure. Cette étape de vérification s'appuie sur les données expérimentales présentées dans la section 2.2. Quatre essais ont été réalisés avec différentes valeurs de débits d'entrée et une configuration de structure identique. Cette configuration permet l'infiltration, *via* un sol sableux, et présentant un drain surélevé de 22 cm par rapport au fond de la structure. Cette sous-section présente la corrélation entre les données mesurées et modélisées pour chacun de ces essais. À chaque fois, les volumes totaux et l'indice NSE de comparaison des hydrographes sont donnés pour l'infiltration et le drainage quand il a lieu.

3.2.2.1 ESSAI DE VÉRIFICATION b1

Cet essai permet une première vérification de la pertinence du modèle pour simuler le débit infiltré. Dans cet essai le débit d'entrée est fixe et aucun drainage ne se produit.

Tableau 3.5 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b1.

	Débit cumulé mesuré (L)	**Débit cumulé modélisé (L)**	**NSE**
Infiltration	244	241	0,78

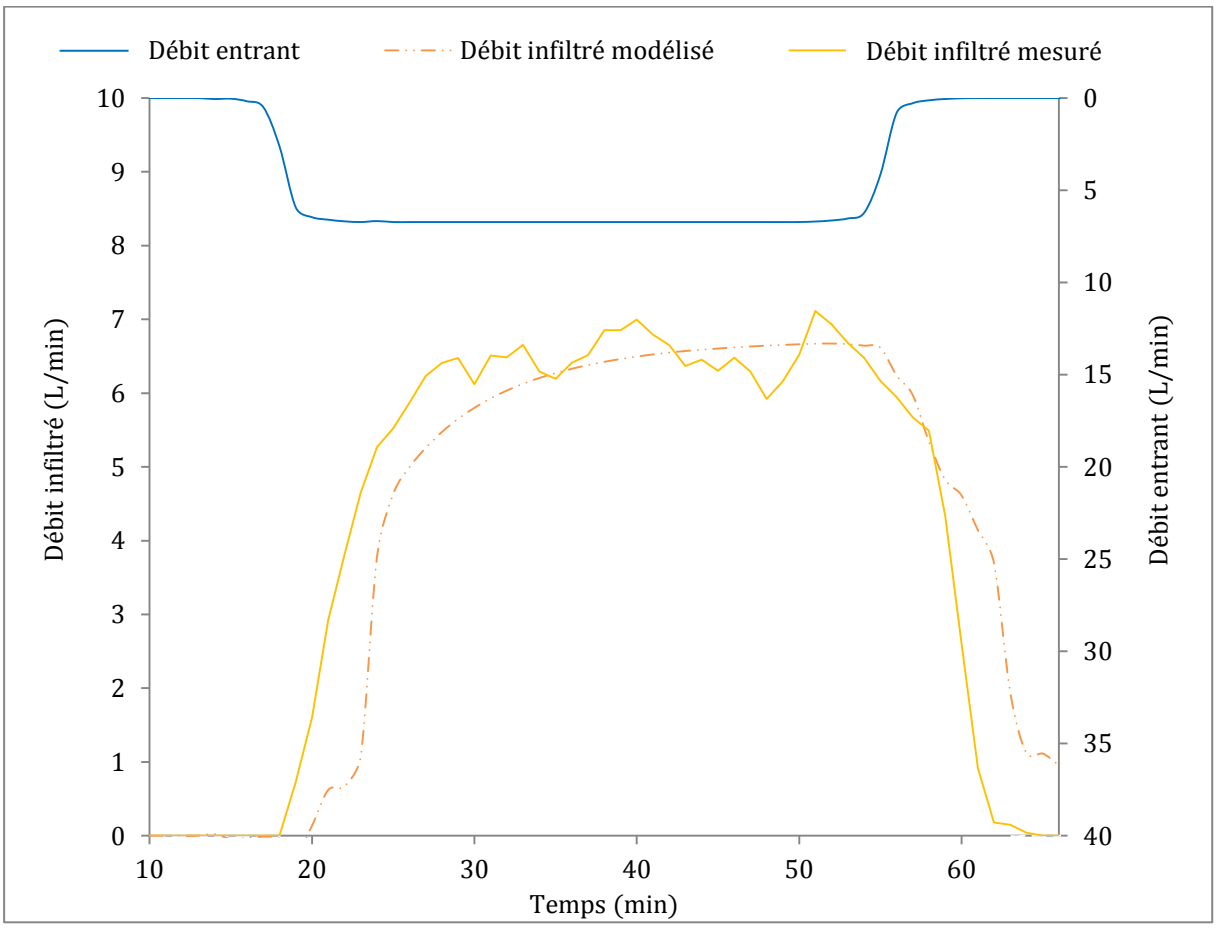


Figure 3.24 - Comparaison des hydrographes d'infiltration modélisés et mesurés (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée modélisé (échelle de droite). Essai de vérification b1.

Ce premier essai présente une corrélation relativement bonne entre les résultats mesurés et modélisés (NSE = 0,78). Quelques différences peuvent cependant être mises en avant :

- la modélisation du début et de la fin de l'infiltration présente un léger retard (2 minutes) par rapport aux résultats de l'essai ;
- le volume total d'infiltration modélisé est plus faible de près de 3 litres par rapport à celui mesuré (soit un écart de 1,2 %) ;
- à la fin de la modélisation (arrêtée à 66 minutes), le débit d'infiltration modélisé n'est pas tout à fait nul (Q_inf = 0,58 L/min).

Ces observations sont liées entre elles, et s'expliquent par le phénomène de rétention d'eau dans la structure (Figure 3.25). Au début de la modélisation, les deux couches de surface stockent par rétention jusqu'à 8 litres d'eau chacune ce qui retarde l'arrivée de l'eau dans la couche de fondation et par conséquent le début de l'infiltration dans le sol. Après l'arrêt de la pluie, ce volume d'eau de rétention s'écoule progressivement vers la couche de fondation puis le sol ce qui prolonge l'infiltration. Enfin, lors de l'arrêt de la modélisation (à 66 minutes), ces deux couches contiennent encore un total de 4 litres d'eau, volume qui correspond (à 1 litre près) à l'écart entre les volumes infiltrés modélisé et mesuré.

Lors de l'essai expérimental, il est probable qu'un tel phénomène de rétention ait lieu mais il est probablement moins marqué. La surestimation de la rétention d'eau par le modèle est probablement due à une sous-estimation du profil de teneur en eau initial dans le modèle par rapport aux conditions de l'essai.

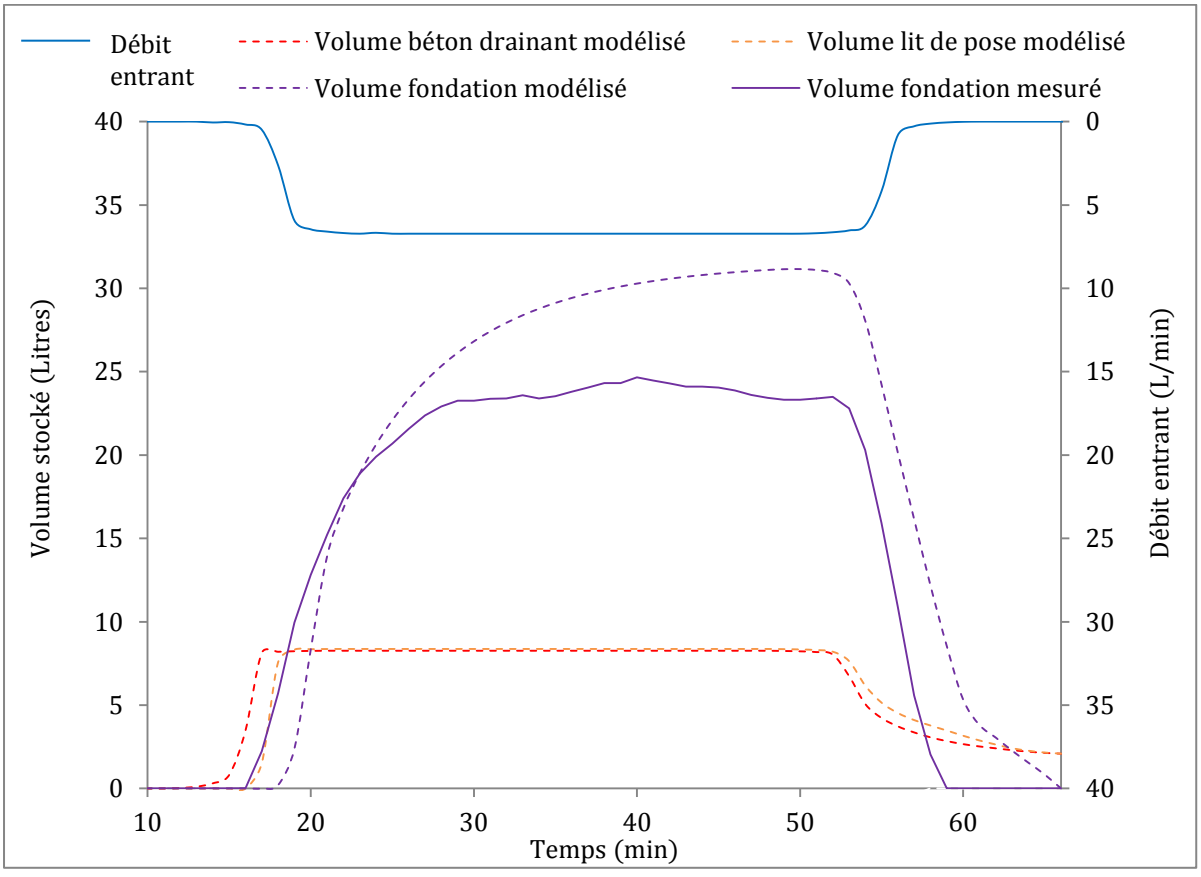


Figure 3.25 - Comparaison du stockage de l'eau dans la structure, modélisé et mesuré (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b1.

La Figure 3.25 présente également le volume mesuré et modélisé stocké dans la fondation. Les résultats montrent que le modèle produit une estimation relativement fidèle du volume stocké, avec à nouveau un léger retard de la modélisation par rapport à l'essai expérimental.

A noter qu'il ne s'agit pas exactement de la même grandeur dans les deux cas. En effet, la mesure expérimentale ne considère que le volume d'eau stocké par saturation au fond de la structure (estimation du volume à partir de la hauteur d'eau mesurée) alors que la valeur donnée par le modèle correspond à l'intégration de la teneur en eau sur l'ensemble de la couche de fondation. Le volume modélisé comprend donc l'eau stockée à saturation dans le fond de la structure et également l'eau stockée par rétention dans le reste de la fondation. Cette différence explique en partie l'écart entre les deux courbes.

3.2.2.2 ESSAI DE VÉRIFICATION b2

Cet essai comprend une phase de mise en charge de la structure jusqu'à ce que le niveau d'eau stocké atteigne le niveau du drain. Le drain évacue alors l'eau en excès jusqu'à l'arrêt de la pluie.

Tableau 3.6 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b2.

	Débit cumulé mesuré (L)	Débit cumulé modélisé (L)	NSE
Drainage	9,7	8,8	0,35
Infiltration	194,8	194,8	0,89

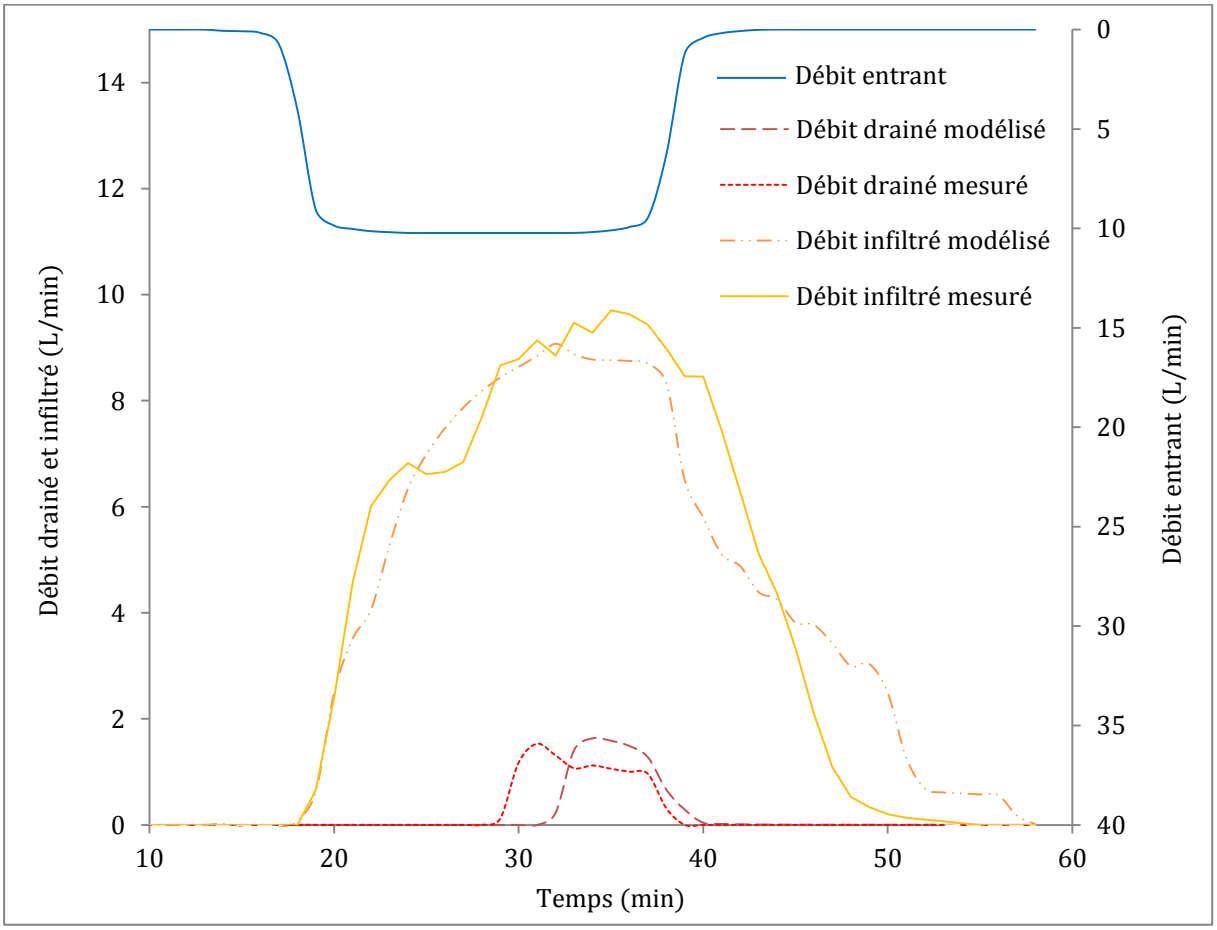


Figure 3.26 – Comparaison des hydrographes modélisés et mesurés (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b2.

Les volumes totaux drainés et infiltrés simulés correspondent raisonnablement bien à ceux mesurés. La différente de 0,95 litre entre le volume drainé mesuré et simulé s'explique, comme pour l'essai b1, principalement par une légère surestimation du stockage dans les couches de surface et de lit de pose en raison du manque de précision de la teneur en eau initiale.

Comme expliqué pour l'essai b1, la surestimation du stockage dans les deux premières couches retarde légèrement le transfert de l'eau vers la couche de fondation et par suite le début du drainage, ce qui explique les 2 minutes de retard du débit drainé modélisé par rapport à l'expérience. Cette rétention explique également, comme dans l'essai b1, le temps d'infiltration modélisé un peu plus long que celui mesuré après l'arrêt de la pluie.

Les valeurs de NSE calculées reflètent ce décalage avec une valeur plus faible pour la corrélation des hydrographes de drainage (NSE = 0,35). La simulation reproduit par contre fidèlement l'infiltration dans la structure (NSE = 0,89).

3.2.2.3 ESSAI DE VÉRIFICATION b3

Cet essai teste la capacité du modèle à représenter avec justesse la dynamique entre différents niveaux d'équilibre. Le débit d'entrée varie selon une fonction créneau entrainant la variation de la hauteur d'eau dans la structure et donc une variation du débit d'infiltration. Le niveau d'eau n'atteint jamais le drain, l'évacuation de l'eau se produit donc exclusivement par infiltration.

Tableau 3.7 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b3.

	Volume total mesuré (L)	Volume total simulé (L)	NSE
Infiltration	528,3	522,6	0,80

Les résultats de ce troisième essai de vérification confirment les observations des deux essais précédents. Le modèle reproduit correctement le volume total d'infiltration (écart de 5,7 litres soit 1 % du volume total d'infiltration mesuré, Tableau 3.7) et simule relativement fidèlement l'évolution du débit (avec une valeur de l'indice NSE entre les deux hydrographes d'infiltration de 0,80).

Il est notamment intéressant de constater que le modèle donne une bonne estimation du pic de débit d'infiltration (débit maximum modélisé de 6,94 L/min contre un débit maximum mesuré de 7,10 L/min) et reproduit relativement fidèlement la phase d'augmentation du débit qui accompagne l'élévation du niveau d'eau dans la structure (Figure 3.27).

En revanche, le modèle reproduit moins fidèlement la phase de diminution du débit avec, dans un premier temps, une vitesse d'infiltration modélisée qui décroît plus vite que le débit mesuré, puis, après la fin de la pluie, un débit d'infiltration modélisé qui décroît plus lentement.

Comme précédemment, la décroissance plus lente du débit d'infiltration modélisé après l'arrêt de la pluie s'explique principalement par le volume d'eau de rétention modélisé dans la structure qui continue de s'écouler doucement vers la fondation et puis vers le sol. À la fin de la modélisation, à $t = 130$ minutes, le volume d'eau de rétention modélisé dans la structure est de 3,74 litres, ce qui explique en partie l'écart avec le volume total infiltré mesuré.

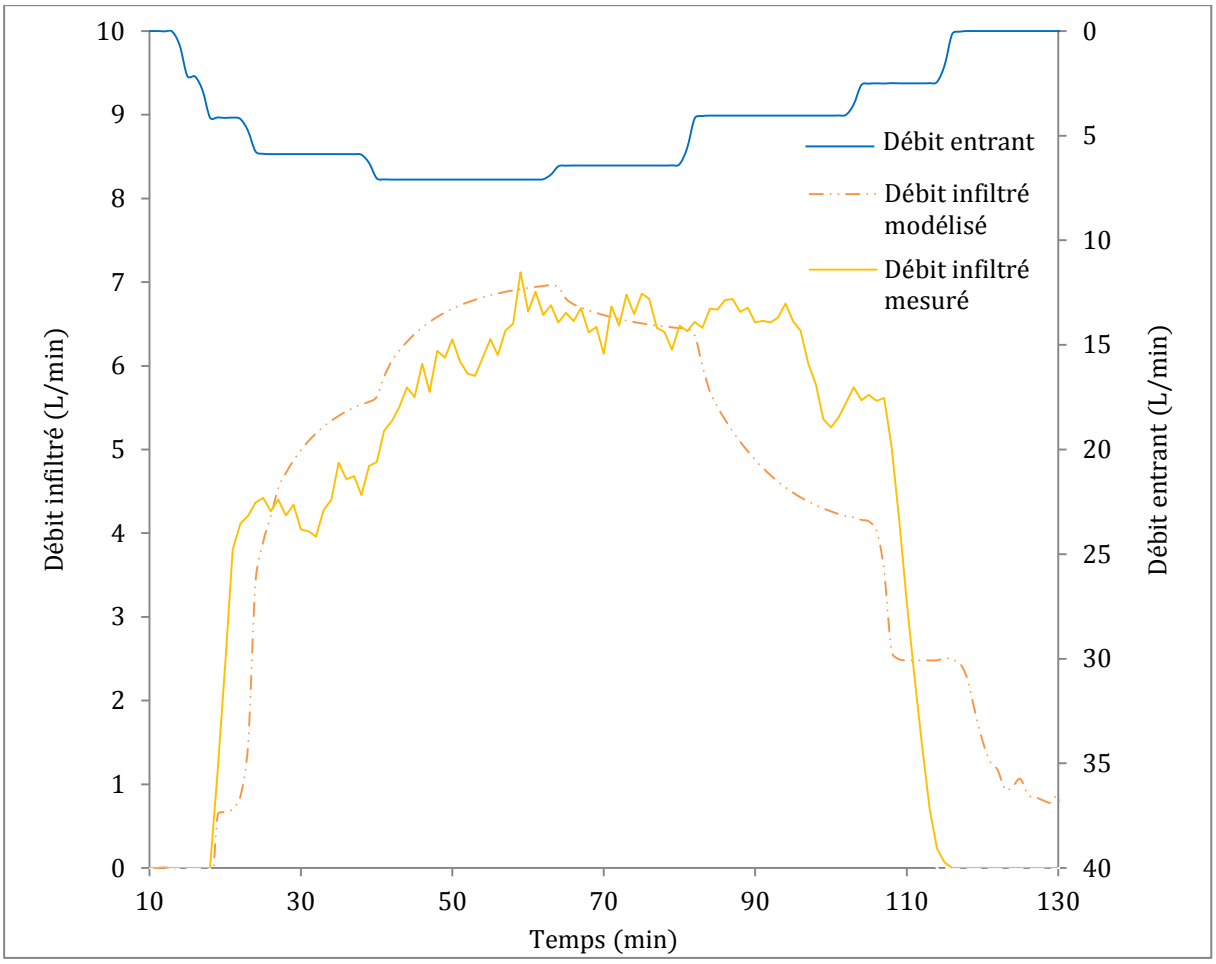


Figure 3.27 - Comparaison de l'hydrogramme du débit infiltré modélisé et mesuré (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b3.

L'écart constaté entre le débit d'infiltration modélisé et mesuré peut aussi s'expliquer par les mesures lors de l'essai expérimental. En effet, d'une part, le débit infiltré mesuré correspond au débit qui sort du banc d'essai en dessous de la couche de sable, là où le débit d'infiltration modélisé correspond au débit qui passe de la fondation vers la couche de sable. D'autre part, la mesure est réalisée par un capteur de pression (piézomètre) dans le bac d'infiltration, capteur qui ne permet pas de mesurer les très faibles débits. Aussi, il est probable que l'infiltration de la fondation vers la couche de sable continue en réalité un peu plus longtemps lors de l'essai expérimental, avec un débit trop faible pour être mesuré expérimentalement ou pour provoquer un écoulement en sortie de la couche de sable.

3.2.2.4 ESSAI DE VÉRIFICATION b4

Comme l'essai b2, cet essai permet de tester la capacité du modèle à reproduire la mise en charge de la structure et l'évacuation de l'eau par le drain. L'essai se décompose en deux parties :

- pendant 32 minutes un débit direct de 5,25 L/min et un débit de ruissellement de 3 L/min, ce qui entraîne une montée du niveau d'eau dans la structure qui se stabilise sans atteindre le drain ;
- puis pendant 5 minutes un débit direct de 2,7 L/min et un débit de ruissellement de 12,6 L/min ce qui entraîne une élévation du niveau d'eau dans la structure jusqu'à la hauteur du drain.

Tableau 3.8 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b4.

	Volume total mesuré (L)	Volume total modélisé (L)	NSE
Drainage	23,1	14,4	0.45
Infiltration	325,7	333,7	0.84

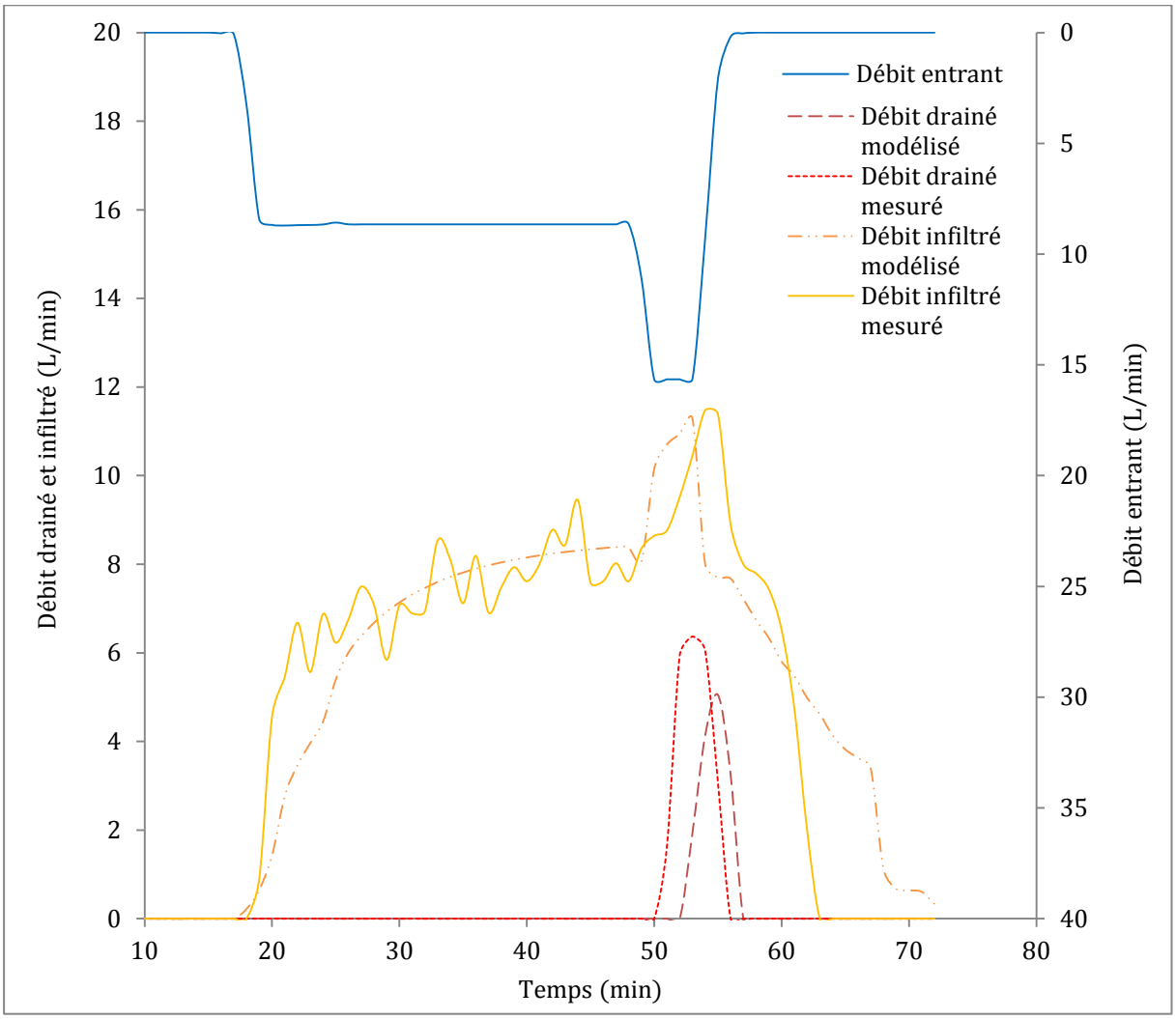


Figure 3.28 - Comparaison des hydrographes modélisés et mesurés (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b4.

Les résultats de cet essai présentent de nombreuses similitudes avec l'essai b2. Le modèle reproduit correctement l'infiltration (NSE = 0,84), notamment la phase de montée en charge et le pic, mais il reproduit moins bien le drainage (NSE = 0,41) avec à nouveau un retard d'environ 2 minutes entre le débit drainé mesuré et le débit drainé modélisé.

Dans cet essai, l'écart entre le volume total drainé mesuré (23,4 litres) et modélisé (14,4 litres) est cependant plus important que dans l'essai b2. Le modèle sous-estime ici fortement le volume drainé. La durée de drainage modélisé et mesuré étant proche, cet écart s'explique principalement par la valeur maximum de débit drainé modélisé plus faible que la valeur mesurée. Cette différence s'explique probablement par une montée du niveau d'eau un peu plus lente dans le modèle entraînant un débit drainé sous-estimé, et par une surestimation du volume drainé mesuré (soit en raison de la mesure du débit drainé soit en raison d'une légère augmentation du débit entrant à ce moment-là de l'essai).

3.2.2.5 CONCLUSION SUR LA VÉRIFICATION DU MODÈLE

Les quatre essais de vérification démontrent que le modèle *PermetAble* permet de représenter de façon relativement correcte l'écoulement de l'eau dans une structure perméable, son stockage et son évacuation par infiltration et drainage.

Le modèle est particulièrement fiable pour l'estimation de l'infiltration avec des indices NSE de 0,78, 0,80, 0,84 et 0,89. La modélisation représente, avec moins de justesse, le débit drainé pour les deux essais concernés (NSE = 0,35 et 0,45). Les écarts de débits drainés sont cependant à relativiser au regard des faibles volumes et des courtes durées de drainage. Un essai avec un volume drainé plus important (similaire à celui de l'essai de calage 'a') aurait permis d'apporter une vérification complémentaire.

Ces essais de vérification ont également mis en évidence le rôle de rétention des couches de surface et l'influence de ce stockage sur la dynamique des écoulements. Cette influence du béton drainant et du lit de pose est étudiée plus en détail dans l'exploration du modèle (3.3).

Enfin, une dernière remarque importante doit être faite au regard des résultats des essais de vérification. Le Tableau 3.9 présente la valeur de vitesse de filtration maximum (*Vw_y_max*) pour les quatre essais. Tous ces essais présentent une vitesse maximum de filtration largement supérieure au seuil fixé pour le respect de l'hypothèse de modélisation qui consiste à négliger l'énergie cinétique ; $\vec{q}_{max} < 1{\cdot}10^{-4}$ m/s (3.1.3.2.d).

Tableau 3.9 – Valeur maximum de la composante verticale de la vitesse de filtration pour les essais de vérification

	Essai b1	**Essai b2**	**Essai b3**	**Essai b4**
Vw_y_max (m/s)	$1{,}6{\cdot}10^{-3}$	$4{\cdot}10^{-2}$	$1{,}9{\cdot}10^{-3}$	$1{,}5{\cdot}10^{-2}$

Ces valeurs élevées s'expliquent en partie par les valeurs de débit entrant très élevées (notamment pour les essais b2 et b4 avec des débits de ruissellement importants) et par les valeurs de perméabilité saturée des différents matériaux, et notamment de la couche de fondation ($K_s = 5{\cdot}10^{-2}$ m/s).

Dans ces conditions, l'hypothèse qui consiste à négliger l'énergie cinétique n'est pas vérifiée, par conséquent les conditions d'utilisation de la loi de DARCY (et par suite l'équation de RICHARDS) ne sont pas vérifiées ce qui peut remettre en cause les résultats obtenus. Il faudrait idéalement explorer l'utilisation de lois mathématiques qui prennent en compte l'énergie cinétique pour évaluer les écarts de résultats induits. Une telle exploration n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail mais présente une perspective majeure, développée dans la conclusion de ce chapitre. La modélisation mathématique à l'aide de l'équation de RICHARDS est donc conservée pour la suite. Il est probable que cela conduise à surestimer la vitesse d'écoulement dans la structure (puisque qu'un facteur de perte de charge est négligé). Dans tous les cas, il est certain que cela fausse la juste représentation des processus modélisés. L'exploitation des résultats de ce modèle demande par conséquent une grande prudence.

En aucun cas, il s'agit donc ici de prétendre que le modèle *PermetAble* permet de représenter exactement les écoulements réels. Les résultats de cette étape de vérification donnent simplement un certain niveau de confiance dans la possibilité d'utiliser ce modèle pour estimer des ordres de grandeurs des processus hydrologiques dans une structure perméable.

SECTION 3.3

3.3 EXPLORATION DU MODÈLE *PERMETABLE*

L'exploration du modèle a été conduite en deux phases. Dans un premier temps, l'ensemble des paramètres du modèle a fait l'objet d'une analyse de sensibilité. Cette analyse, paramètre par paramètre, permet de mettre en évidence les paramètres de dimensionnement ou de contexte qui influencent le plus les résultats de la structure. Les principaux résultats sont présentés dans la sous-section 3.3.1. Dans un deuxième temps, à partir des résultats de l'analyse de sensibilité, différents scénarios ont été construits et comparés entre eux pour quantifier les performances des structures à revêtements perméables dans différents contextes hydrologiques et avec différents dimensionnements. Ces résultats sont présentés dans la sous-section 3.3.2. L'ensemble des résultats de l'exploration du modèle est repris dans la conclusion de ce chapitre qui présente une synthèse de l'exploration du modèle et propose une présentation simplifiée du fonctionnement des structures perméables.

3.3.1 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

L'analyse de sensibilité a été conduite dans le but de tester l'influence de chaque caractéristique de la structure sur les résultats du modèle et sur le comportement de l'eau dans la structure. Elle a été réalisée paramètre par paramètre, ce qui ne permet pas d'étudier des effets combinés de paramètres entre eux, et avec des plages de variation inégales pour chaque paramètre. Cette analyse comporte donc de nombreuses limites et ne saurait prétendre à donner une vision exhaustive de l'influence des paramètres sur le modèle. Malgré ces limites, les essais réalisés ont permis de mettre en avant certains paramètres d'entrée et d'approfondir la compréhension de leur influence sur le comportement hydrologique de la structure. Pour chaque indicateur, un traitement par régression linéaire multiple a été réalisé pour compléter l'analyse des résultats obtenus et permettre l'identification de l'influence de chaque paramètre.

3.3.1.1 PRÉSENTATION DES PARAMÈTRES ET DES RÉSULTATS DES ESSAIS

a. Simulation de référence

Pour pouvoir comparer les résultats de chaque essai, il faut définir une simulation de référence. Cette simulation a été construite en se basant sur les caractéristiques du site expérimental d'Épron. Les paramètres d'entrée utilisés sont précisés ci-dessous.

À noter que l'analyse de sensibilité a été réalisée avant le calage de K_{min}. Aussi, les valeurs utilisées ici pour la description des matériaux diffèrent un peu de celles finalement retenues. Une simulation de comparaison a été réalisée pour estimer l'impact de cet écart.

- Géométrie :
    - structure : 5 mètres de large, pas de pente, 8 cm de pavés drainant, 4 cm de lit de pose, 50 cm de fondation, un drain de 8 cm de diamètre positionné à 6 cm du fond de la structure et au centre de la largeur, pas de géomembrane au fond ;
    - site : une surface contributrice de gauche de 5 mètres, pas de surface contributrice à droite (ratio surface imperméable/perméable de 1), un toit de nappe situé à 2 mètres, soit une épaisseur de 1,38 mètres de sol sous la structure.

- Matériaux :
  - Structure :
    - béton drainant : $K_s = 1 \cdot 10^{-3}$, $K_{min} = 1 \cdot 10^{-6}$, $\alpha = 30$, $n = 6$;
    - gravillon : $K_s = 7 \cdot 10^{-4}$, $K_{min} = 7 \cdot 10^{-7}$, $\alpha = 48$, $n = 5$;
    - gravier : $K_s = 5 \cdot 10^{-2}$, $K_{min} = 5 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 100$, $n = 5$.
  - Sol : limon (se reporter au tableau de synthèse IV.1.5).
- Hydrologie :
  - pluie : événement extrême du 22 juillet 2013 (orage de 83,6 mm en 3 heures) ;
  - ETP : 4 mm/jour, soit $4{,}6 \cdot 10^{-8}$ m/s (valeur moyenne du 22 juillet 2013), pas de coefficient de correction, pas de valeur limite de succion ;
  - ruissellement : longueur de pénétration du ruissellement de 20 cm, coefficient de ruissellement de 0,9, pas d'interception.

Les résultats de cette simulation sont présentés dans le Tableau 3.10. La Figure 3.29 illustre l'évolution des débits cumulés de chaque processus hydrologique au cours du temps.

Tableau 3.10 - Résultats de la simulation de référence pour l'analyse de sensibilité du modèle *PermetAble*.

Processus hydrologiques				**Stockage dans la structure**				**Décalages temporels**	
Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain
%	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*minutes*	*minutes*
1,3	55,3	43,4	0,0	32,2	5,3	3,5	25,1	10,9	13

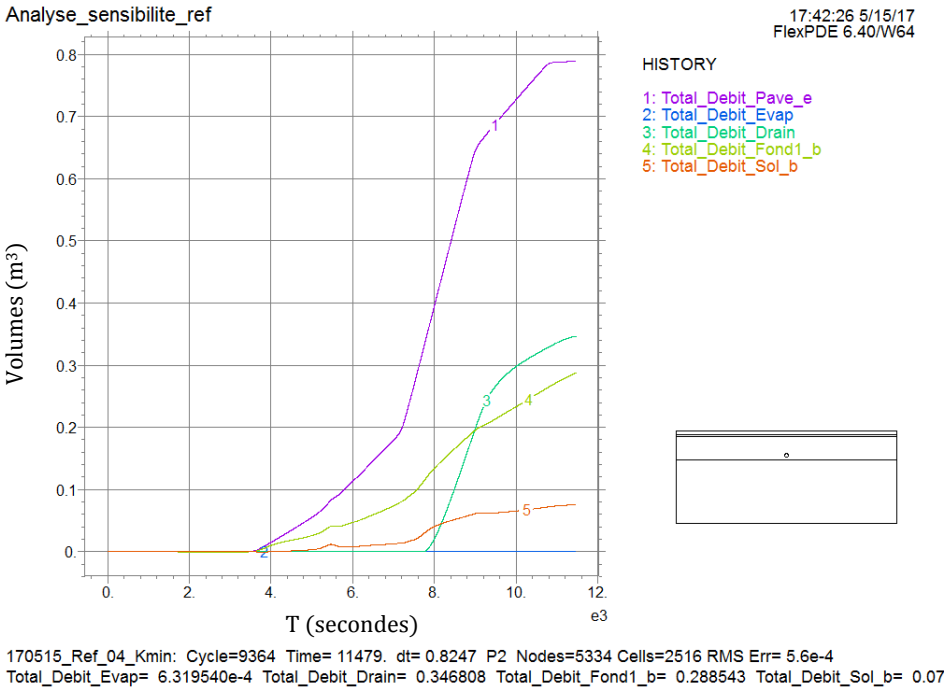


Figure 3.29 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution des débits cumulés au cours du temps au moment de la fin de la pluie $t = 11479$ secondes (Simulation de référence pour l'analyse de sensibilité).

Ces résultats présentent une répartition du volume d'eau entrée (798 litres) entre l'infiltration (55,3 %) et le drainage (43,4 %). L'évaporation ne représente que 1,3 % ce qui est logique compte tenu de l'importance de la pluie et du temps de drainage considéré.

Le stockage dans la structure atteint un maximum de 257 litres, majoritairement stockés dans la couche de fondation (200 litres). Ce stockage est maximum 11 minutes après le pic de la pluie, il décroit ensuite à la vitesse de la capacité d'infiltration du sol (Figure 3.30). Le drainage de la structure se termine 68 minutes après la fin de la pluie.

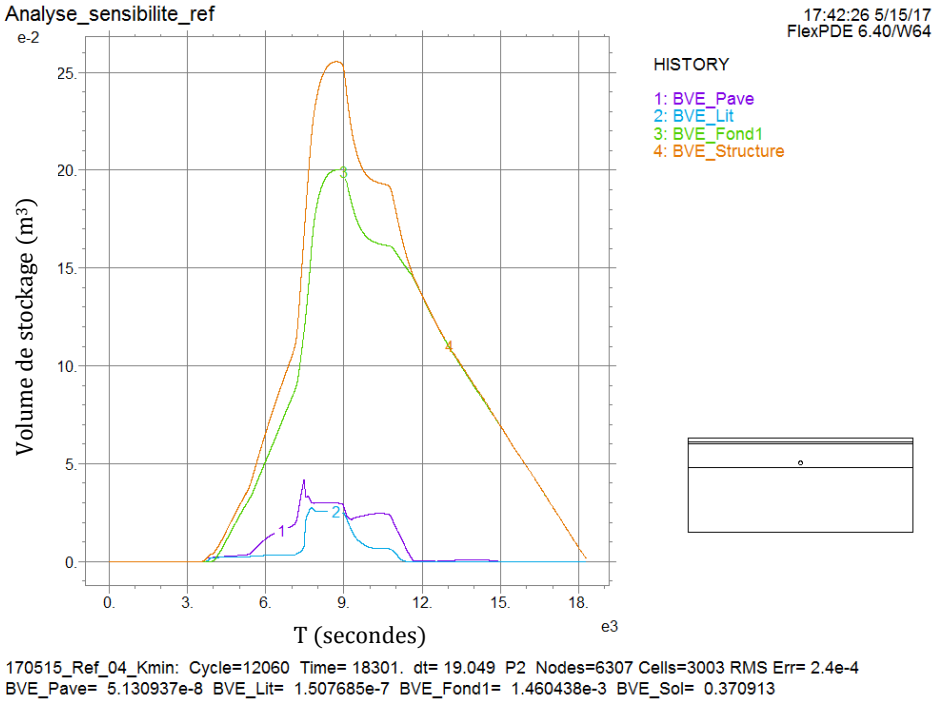


Figure 3.30 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution du stockage cours du temps au moment de la fin du drainage $t = 18301$ secondes (Simulation de référence pour l'analyse de sensibilité).

b. Présentation des essais et des résultats

Les essais réalisés sont présentés dans le Tableau 3.11. Ce tableau donne pour chaque essai les valeurs des paramètres utilisés avec une mise en évidence de la valeur modifiée. Les résultats de chaque essai sont présentés dans les tableaux 3.12 et 3.13.

Le nom donné à chaque essai est construit de la façon suivante : *AS* (pour analyse de sensibilité) *_ Nom du paramètre _ valeur donnée au paramètre ou +/-* (pour signifier une augmentation/diminution par rapport à la valeur de référence). Par exemple : *AS_Nappe+* est le nom de l'essai d'analyse de sensibilité portant sur la profondeur de nappe avec une profondeur augmentée (5 mètres au lieu de 2).

Certains essais correspondent à la variation de données non renseignées sur le Tableau 3.11 :

- *AS_Matériaux* : correspond à un essai identique à celui de référence utilisant les valeurs de *Ks, Kmin, α* et *n* optimisées pour la description des matériaux de la structure. Cet essai est réalisé pour mesurer l'erreur induite par l'utilisation des paramètres précédents ;
- *AS_Argile* et *AS_Sable* : correspondent à des essais de variation du sol. Les paramètres de description de la couche de sol sont modifiés selon les valeurs données dans la section 2.1.
- *AS_Colmat_x %* : ces essais correspondent à des simulations où la valeur de K_s de la surface et du lit de pose est réduite de x % pour simuler un colmatage de la structure.
- *AS_Lit* : essais où la valeur de K_s de la couche indiquée est modifiée (Lit de pose, ou fondation).

Tableau 3.11 – Liste des essais d'analyse de sensibilité réalisée et présentation des valeurs des paramètres utilisés.

Nom	Geo_f	Drain	Pave_L	Pave_P	Pave_e	Lit_e	Fond_e	Drain_h	Drain_r	Drain_x	Sol_e	Nappe_h	BV_L	Surf_e	Autre
	-	-	*m*	*%*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	
AS_Reference	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	-
AS_Geo_fond	1	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,041	0,04	2,5	0,00	2	5	0,2	
AS_Sans_drain	0	0	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Argile	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Sable	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_P5%	0	1	5	5	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_P-5%	0	1	5	-5	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Fond-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,2	0,1	0,04	2,5	1,68	2	5	0,2	
AS_Nappe-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	0,38	1	5	0,2	
AS_Nappe+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	4,38	5	5	0,2	
AS_Drain_h+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,25	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Drain_x-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	0,06	1,38	2	5	0,2	
AS_Drain_x+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	4,94	1,38	2	5	0,2	
AS_Surf1_L+Drain_h+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,25	0,04	2,5	1,38	2	25	0,2	
AS_Surf1_L_Surf2_L*	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Pave_L-	0	1	1	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	0,5	1,38	2	1	0,2	
AS_Pave_L+	0	1	10	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	5	1,38	2	10	0,2	
AS_Surf_e+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,5	
AS_Surf_e-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,05	
AS_Surf_L = 0	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	0	0,2	
AS_Colmat20%	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Colmat50%	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Colmat50%_Surf_e+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,5	
AS_Colmat90%	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Colmat90%_Surf_e+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,5	
AS_Colmat90%_Surf_e++	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	1	
AS_Colmat90%_Surf_e+++	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	2	

Nom	Geo_f	Drain	Pave_L	Pave_P	Pave_e	Lit_e	Fond_e	Drain_h	Drain_r	Drain_x	Sol_e	Nappe_h	BV_L	Surf_e	Autre
	-	-	*m*	*%*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	
AS_Colmat_Fond90%	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Pave_e-	0	1	5	0	0,04	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,42	2	5	0,2	
AS_Pave_e+	0	1	5	0	0,12	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,34	2	5	0,2	
AS_Lit_e-	0	1	5	0	0,08	0,03	0,5	0,1	0,04	2,5	1,39	2	5	0,2	
AS_lit_e+	0	1	5	0	0,08	0,05	0,5	0,1	0,04	2,5	1,37	2	5	0,2	
AS_Drain_h-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,046	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Drain_r-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,03	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Drain_r+	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,05	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Qs_d_Lim-	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	Drain_Q_max = 0,076L/s
AS_Qs_d_Lim--	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	Drain_Q_max = 0,012L/s
AS_Fond_0.01	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Fond_0.001	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Fond_0.005	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Fond_0.1	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Lit_0.001	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Lit_0.05-Fond_0.005	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Lit_0.005	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Lit_0.005	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Lit_0.0001	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	
AS_Evap_hw_2	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	$h_r = 2$ mH_2O
AS_Evap_hw_1	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	$h_r = 1$ mH_2O
AS_Materiaux	0	1	5	0	0,08	0,04	0,5	0,1	0,04	2,5	1,38	2	5	0,2	

**Pour cet essai la surface contributrice de gauche et la surface contributrice de droite sont égales à 2,5 mètres. Ce qui donne bien 5 mètres de surface contributrice au total.*

Tableau 3.12 - Résultats des essais d'analyse de sensibilité. Pour la colonne *Vw_y_max* les valeurs de vitesse de filtration au-dessus du seuil de validité de l'hypothèse de modélisation ($Vw\_y\_max < 1 \cdot 10^{-4}$) sont indiquées en rouge.

Nom	Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain	h_max	Vw_y_max
	%	%	%	%	%	%	%	%	*min*	*min*	*m*	*m/s*
AS_Reference	1,3	55,3	43,4	0,0	32,2	5,27	3,51	25,07	10,83	13	0,14	$2,5 \cdot 10^{-2}$
AS_Geo_fond	1,2	0,0	98,6	0,0	23,3	3,92	3,80	15,33	11,67	7	0,103	$5,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Sans_drain	1,3	98,7	0,0	0,0	50,0	5,00	3,50	46,24	35,00	-	0,19	$1,25 \cdot 10^{-4}$
AS_Argile	1,2	4,3	78,1	16,5	33,0	4,95	3,46	25,97	0,00	7	0,2	$6,0 \cdot 10^{-5}$
AS_Sable	1,3	98,7	0,1	0,0	10,7	4,84	3,69	3,06	1,67	-	0,025	$1,35 \cdot 10^{-2}$
AS_P5%	1,3	60,9	37,9	0,0	33,1	4,99	3,49	26,82	13,33	15	0,19	$1,3 \cdot 10^{-3}$
AS_P-5%	1,3	56,2	42,5	0,0	32,5	5,01	3,50	25,65	12,50	13	0,22	$5,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Fond-	1,3	60,3	38,4	0,0	31,9	3,94	3,43	24,79	13,33	14	0,15	$5,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Nappe-	1,3	51,9	46,9	0,0	34,0	4,40	4,15	25,78	10,83	13	0,13	$2,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Nappe+	1,2	33,6	65,2	0,0	32,9	4,96	3,47	26,05	10,00	13	0,21	$1,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Drain_h+	1,3	98,7	0,0	0,0	49,8	5,00	3,50	46,01	38,33	-	0,18	$3,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Drain_x-	1,3	40,7	58,0	0,0	30,6	5,25	3,50	23,77	12,33	-	0,09	$1,8 \cdot 10^{-2}$
AS_Drain_x+	1,3	62,4	36,4	0,0	40,6	5,06	3,50	33,12	14,83	16	0,17	$1,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Surf1_L+Drain_h+	0,4	49,5	50,0	0,0	25,7	1,73	1,24	23,14	8,33	12	0,32	$3,0 \cdot 10^{-2}$
AS_Surf1_L_Surf2_L	1,3	55,5	43,2	0,0	33,7	5,26	3,64	26,30	11,67	13	0,13	$6,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Pave_L-	0,8	60,8	38,7	0,0	29,1	5,08	4,01	20,68	6,67	11	0,08	$5,0 \cdot 10^{-4}$
AS_Pave_L+	1,2	50,4	48,4	0,0	39,2	5,33	3,39	32,63	13,17	17	0,22	$2,0 \cdot 10^{-2}$
AS_Surf_e+	1,0	55,3	43,7	0,0	33,1	5,27	3,64	25,34	10,00	12	0,13	$2,8 \cdot 10^{-3}$
AS_Surf_e-	1,3	55,0	43,7	0,0	31,6	5,27	3,51	24,84	10,00	12	0,14	$2,0 \cdot 10^{-2}$
AS_Surf_L = 0	2,4	91,7	5,9	0,0	48,2	10,12	6,02	37,59	15,00	18	0,1	$1,2 \cdot 10^{-4}$
AS_Colmat20%	1,3	55,2	43,5	0,0	32,6	5,26	3,51	25,07	10,00	12	0,14	$3,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Colmat50%	1,3	55,6	43,2	0,0	33,7	6,16	4,10	25,13	10,83	12	0,16	$3,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Colmat50%_Surf_e+	1,3	55,5	43,4	0,0	34,9	6,27	4,52	25,60	10,00	13	0,13	$2,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Colmat90%	1,3	57,5	41,3	0,0	39,1	8,71	5,84	25,25	13,33	15	0,16	$2,5 \cdot 10^{-3}$
AS_Colmat90%_Surf_e+	1,3	56,9	41,9	0,0	40,3	8,73	6,21	25,80	13,33	16	0,14	$1,5 \cdot 10^{-3}$
AS_Colmat90%_Surf_e++	1,3	57,3	41,5	0,0	43,1	9,20	7,31	26,86	12,50	15	0,13	$2,0 \cdot 10^{-3}$
AS_Colmat90%_Surf_e+++	1,3	57,1	41,7	0,0	44,4	9,21	8,07	27,50	13,33	15	0,1	$3,5 \cdot 10^{-4}$

Nom	Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain	h_max	Vw_y_max
	%	%	%	%	%	%	%	%	min	min	m	m/s
AS_Fond90%	1,3	86,5	12,2	0,0	44,1	5,29	3,53	37,78	15,00	13	0,29	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Pave_e-	1,3	59,3	40,0	0,0	29,5	4,11	3,48	24,89	13,33	17	0,13	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$
AS_Pave_e+	1,3	48,6	50,1	0,0	33,7	7,17	3,52	24,92	13,33	15	0,13	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Lit_e-	1,3	52,8	45,9	0,0	31,6	5,31	2,53	25,53	9,17	10	0,16	$1{,}4 \cdot 10^{-2}$
AS_lit_e+	1,3	63,2	35,5	0,0	32,6	5,29	4,16	24,95	10,00	12	0,16	$9{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Drain_h-	1,3	31,2	67,5	0,0	24,3	5,28	3,52	17,48	10,83	13	0,13	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$
AS_Drain_r-	1,3	48,0	50,7	0,0	34,1	5,27	3,51	27,08	10,83	13	0,16	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$
AS_Drain_r+	1,3	43,5	55,2	0,0	30,4	5,27	3,51	23,58	10,00	13	0,14	$1{,}5 \cdot 10^{-2}$
AS_Qs_d_Lim-	1,3	71,5	27,3	0,0	44,2	5,14	3,51	38,08	15,00	15	0,17	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Qs_d_Lim--	1,3	88,5	10,2	0,0	46,6	5,13	3,51	43,27	6,50	15	0,19	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$
AS_Fond_0.01	1,3	66,9	31,9	0,0	40,7	5,28	3,52	33,93	15,00	18	0,23	$1{,}3 \cdot 10^{-3}$
AS_Fond_0.001	1,3	94,7	4,0	0,0	47,3	5,30	3,53	42,89	31,67	66	0,43	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$
AS_Fond_0.005	1,3	86,5	12,2	0,0	44,1	5,29	3,53	37,78	15,00	13	0,29	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Fond_0.1	1,3	54,0	44,8	0,0	29,9	5,27	3,51	21,59	6,67	8	0,13	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$
AS_Lit_0.001	1,3	54,7	44,0	0,0	31,6	5,31	3,16	25,30	8,33	12	0,15	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Lit_0.05-Fond_0.005	1,3	86,3	12,4	0,0	43,3	3,27	0,37	40,07	15,00	19	0,3	$1{,}8 \cdot 10^{-2}$
AS_Lit_0.005	1,4	49,0	49,6	0,0	31,7	3,96	0,48	27,32	10,00	13	0,16	$1{,}8 \cdot 10^{-2}$
AS_Lit_0.005	1,4	50,0	48,6	0,0	31,8	3,97	0,48	27,35	10,00	12	0,15	$1{,}8 \cdot 10^{-2}$
AS_Lit_0.0001	1,3	56,4	42,3	0,0	37,8	5,08	6,99	26,06	10,00	15	0,15	$6{,}0 \cdot 10^{-3}$
AS_Evap_hw_2	0,7	55,9	43,5	0,0	32,2	5,27	3,51	25,07	10,83	13	0,14	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$
AS_Evap_hw_1	0,2	56,3	43,6	0,0	32,2	5,27	3,51	25,07	10,83	13	0,14	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$
AS_Materiaux	1,3	43,8	54,9	0,0	42,0	4,92	4,79	32,27	11,67	15	0,13	$6{,}8 \cdot 10^{-2}$

Tableau 3.13 - Résultats des essais d'analyse de sensibilité comparés à l'essai de référence (Résultat essai – résultat référence). La coloration des cellules est proportionnelle à leur valeur, en vert de plus en plus foncé pour les valeurs positives et en rouge de plus en plus foncé pour les valeurs négatives.

Nom	Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain	h_max
	%	%	%	%	%	%	%	%	*min*	*min*	*m*
AS_Reference	1,3%	55,3%	43,4%	0,0%	32,2%	5,27%	3,51%	25,07%	10,83	13	0,14
AS_Geo_fond	0,0	-55,3	55,2	0,0	-8,9	-1,3	0,3	-9,7	0,83	-6	-0,037
AS_Sans_drain	0,0	43,4	-43,4	0,0	17,8	-0,3	0,0	21,2	24,17		0,05
AS_Argile	0,0	-51,0	34,7	16,5	0,8	-0,3	0,0	0,9	-10,83	-6	0,06
AS_Sable	0,0	43,3	-43,4	0,0	-21,5	-0,4	0,2	-22,0	-9,17		-0,115
AS_P5%	0,0	5,5	-5,6	0,0	0,8	-0,3	0,0	1,8	2,50	2	0,05
AS_P-5%	0,0	0,9	-0,9	0,0	0,3	-0,3	0,0	0,6	1,67	0	0,08
AS_Fond-	0,0	4,9	-5,0	0,0	-0,3	-1,3	-0,1	-0,3	2,50	1	0,01
AS_Nappe-	0,0	-3,5	3,4	0,0	1,7	-0,9	0,6	0,7	0,00	0	-0,01
AS_Nappe+	0,0	-21,7	21,8	0,0	0,7	-0,3	0,0	1,0	-0,83	-1	0,07
AS_Drain_h+	0,0	43,4	-43,4	0,0	17,5	-0,3	0,0	20,9	27,50		0,04
AS_Drain_x-	0,0	-14,6	14,6	0,0	-1,6	0,0	0,0	-1,3	1,50		-0,05
AS_Drain_x+	0,0	7,0	-7,0	0,0	8,4	-0,2	0,0	8,0	4,00	3	0,03
AS_Surf1_L+Drain_h+	-0,8	-5,8	6,6	0,0	-6,5	-3,5	-2,3	-1,9	-2,50	-1	0,18
AS_Surf1_L_Surf2_L	0,0	0,2	-0,2	0,0	1,5	0,0	0,1	1,2	0,83	-1	-0,01
AS_Pave_L-	-0,5	5,4	-4,8	0,0	-3,1	-0,2	0,5	-4,4	-4,17	-2	-0,06
AS_Pave_L+	0,0	-4,9	5,0	0,0	7,0	0,1	-0,1	7,6	2,33	4	0,08
AS_Surf_e+	-0,3	0,0	0,3	0,0	0,9	0,0	0,1	0,3	-0,83	-1	-0,01
AS_Surf_e-	0,0	-0,3	0,3	0,0	-0,6	0,0	0,0	-0,2	-0,83	-1	0
AS_Surf_L = 0	1,2	36,4	-37,5	0,0	16,0	4,9	2,5	12,5	4,17	5	-0,04
AS_Colmat20%	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	-0,83	-1	0
AS_Colmat50%	0,0	0,2	-0,3	0,0	1,5	0,9	0,6	0,1	0,00	-1	0,02
AS_Colmat50%_Surf_e+	0,0	0,2	0,0	0,0	2,7	1,0	1,0	0,5	-0,83	0	-0,01
AS_Colmat90%	0,0	2,2	-2,2	0,0	6,9	3,4	2,3	0,2	2,50	2	0,02
AS_Colmat90%_Surf_e+	0,0	1,5	-1,6	0,0	8,1	3,5	2,7	0,7	2,50	3	0
AS_Colmat90%_Surf_e++	0,0	1,9	-2,0	0,0	10,9	3,9	3,8	1,8	1,67	2	-0,01
AS_Colmat90%_Surf_e+++	0,0%	1,7	-1,7	0,0	12,2	3,9	4,6	2,4	2,50	2	-0,04

Nom	Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain	h_max
	%	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*min*	*min*	*m*
AS_Fond90	0,0	31,2	-31,2	0,0	11,9	0,0	0,0	12,7	4,17	0	0,15
AS_Pave_e-	0,0	4,0	-3,4	0,0	-2,7	-1,2	0,0	-0,2	2,50	4	-0,01
AS_Pave_e+	0,0	-6,7	6,7	0,0	1,5	1,9	0,0	-0,2	2,50	2	-0,01
AS_Lit_e-	0,0	-2,5	2,5	0,0	-0,6	0,0	-1,0	0,5	-1,67	-3	0,02
AS_lit_e+	0,0	7,9	-7,9	0,0	0,4	0,0	0,6	-0,1	-0,83	-1	0,02
AS_Drain_h-	0,0	-24,1	24,1	0,0	-8,0	0,0	0,0	-7,6	0,00	-1	-0,01
AS_Drain_r-	0,0	-7,3	7,3	0,0	1,9	0,0	0,0	2,0	0,00	0	0,02
AS_Drain_r+	0,0	-11,8	11,8	0,0	-1,9	0,0	0,0	-1,5	-0,83	0	0
AS_Qs_d_Lim-	0,0	16,1	-16,1	0,0	12,0	-0,1	0,0	13,0	4,17	2	0,03
AS_Qs_d_Lim--	0,0	33,2	-33,2	0,0	14,4	-0,1	0,0	18,2	-4,33	2	0,05
AS_Fond_0.01	0,0	11,5	-11,5	0,0	8,5	0,0	0,0	8,9	4,17	5	0,09
AS_Fond_0.001	0,0	39,4	-39,4	0,0	15,1	0,0	0,0	17,8	20,83	53	0,29
AS_Fond_0.005	0,0	31,2	-31,2	0,0	11,9	0,0	0,0	12,7	4,17	0	0,15
AS_Fond_0.1	0,0	-1,4	1,4	0,0	-2,4	0,0	0,0	-3,5	-4,17	-5	-0,01
AS_Lit_0.001	0,0	-0,6	0,6	0,0	-0,6	0,0	-0,3	0,2	-2,50	-1	0,01
AS_Lit_0.05-Fond_0.005	0,1	31,0	-31,0	0,0	11,1	-2,0	-3,1	15,0	4,17	6	0,16
AS_Lit_0.005	0,1	-6,3	6,2	0,0	-0,5	-1,3	-3,0	2,2	-0,83	-1	0,02
AS_Lit_0.005	0,1	-5,3	5,2	0,0	-0,4	-1,3	-3,0	2,3	-0,83	-1	0,01
AS_Lit_0.0001	0,0	1,1	-1,1	0,0	5,5	-0,2	3,5	1,0	-0,83	2	0,01
AS_Evap_hw_2	-0,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0
AS_Evap_hw_1	-1,1	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0
AS_Materiaux	0,0	-11,5	11,5	0,0	9,8	-0,3	1,3	7,2	0,83	2	-0,01

3.3.1.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

Une remarque préalable s'impose à la lecture du Tableau 3.12 ; comme pour les simulations de vérification, tous les essais (à une exception près) présentent une vitesse maximum de filtration supérieure au seuil fixé pour le respect de l'hypothèse de modélisation qui consiste à négliger l'énergie cinétique (3.1.3.2.d). La vitesse de filtration atteint quasiment systématiquement des vitesses au-dessus de $1 \cdot 10^{-3}$ m/s et même régulièrement au-dessus de $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Dans ces conditions, il n'est pas valable de négliger l'énergie cinétique. Cependant, comme précisé précédemment, cette modélisation sera malgré tout utilisée, en gardant à l'esprit que la perte de charge due à l'énergie cinétique est négligée ici alors qu'elle influence les écoulements réels.

Concernant l'analyse des résultats, le Tableau 3.13 est intéressant pour donner une vue d'ensemble et mettre en évidence les écarts majeurs mais il reste limité pour faire ressortir des enseignements sur l'influence des paramètres. Pour approfondir l'analyse, trois indicateurs d'écart entre un essai donné (i) et l'essai de référence (0) ont été retenus.

1. Écart sur les processus hydrologiques : $Ind1 = [Vs\_Inf(i) - Vs\_Inf(0)]/Vs\_Inf(0)$
2. Écart sur le stockage : $Ind2 = [V\_Stock\_max(i) - V\_Stock\_max(0)]/V\_Stock\_max(0)$
3. Écart sur la temporalité : $Ind3 = [DT\_Pic\_Stock(i) - DT\_Pic\_Stock(0)]/DT\_Pic\_Stock(0)$

Ces indicateurs sont utilisés ici pour identifier les paramètres les plus influents (valeur d'indicateur au-dessus d'un seuil de 10 % de modification), et décrire leur influence et ceux qui semblent ne pas avoir d'influence significative sur les résultats du modèle.

a. Influence des paramètres sur les processus hydrologiques

L'indicateur 1 permet de mettre en évidence les paramètres qui influencent le plus la répartition entre les différents processus hydrologiques, notamment la répartition entre l'évacuation *via* le drain ou par infiltration dans le sol. L'évaporation étant quasiment toujours identique et très faible et le stockage final toujours nul (à une exception notable près), une augmentation de l'infiltration correspond à une diminution de l'évacuation *via* le drain et inversement.

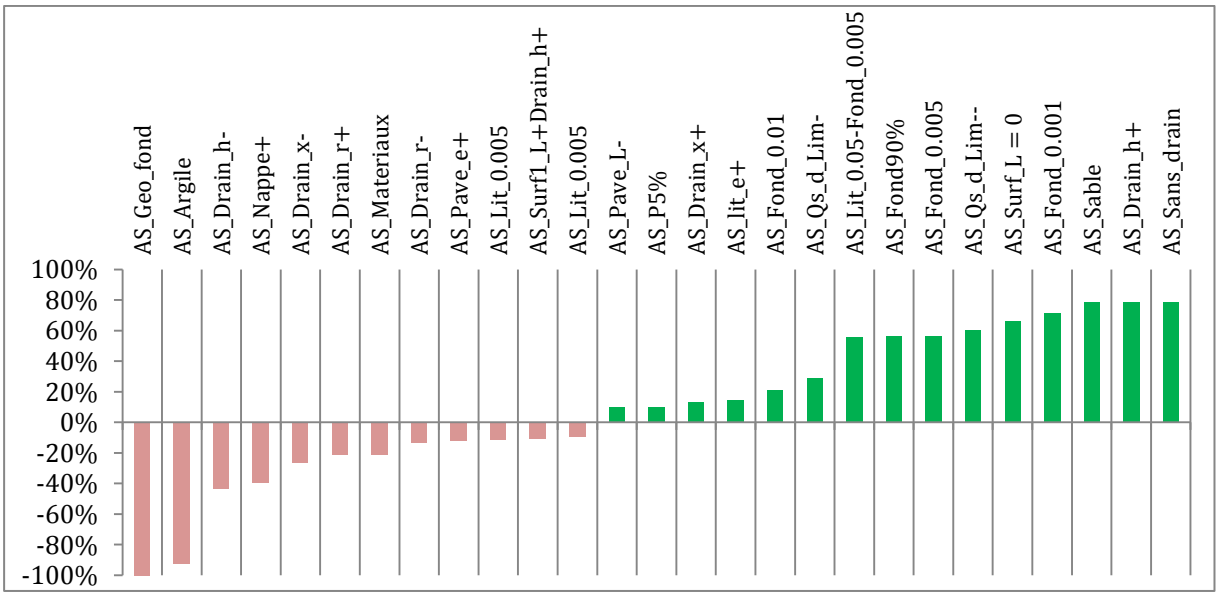


Figure 3.31 –Indicateur 1. Influence des paramètres sur l'infiltration modélisée par le modèle *PermetAble*.

La Figure 3.31 représente l'influence des paramètres sur l'infiltration. Ce graphique permet plusieurs observations qui sont détaillées ici. Certaines seront approfondies ensuite (3.3.1.3).

- Sans surprise l'ajout d'une géomembrane qui empêche l'infiltration entraîne une diminution à 100 % de l'infiltration (le drain est alors situé au fond de la structure et évacue toute l'eau qui atteint le fond).
- À l'opposé, sans surprise également, le fait de ne pas mettre de drain, ou de le placer plus haut entraîne l'absence de volume drainé au profit de l'infiltration. Il est intéressant de noter ici que l'eau n'atteint pas le drain situé à mi-hauteur de la fondation. Ce choix de dimensionnement permet donc de passer d'environ 50 % du volume entrant drainé à 0 % sans que le niveau d'eau dépasse le milieu de la couche de fondation ($h_{max} = 18$ cm).
- Autre résultat prévisible : l'influence de la nature du sol. Augmentation importante de l'infiltration pour un sol sableux ($K_s = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s) avec 98,7 % du volume infiltré et aucun drainage. Diminution importante de l'infiltration dans le cas où le sol est composé d'argile ($K_s = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s) avec seulement 4,3 % d'infiltration pour 78,1 % de drainage. Cet essai est d'ailleurs le seul présentant un stockage final (*V_stock_fin* = 16,5 % du volume entré). Il peut être considéré qu'avec un temps de vidange plus long ce volume sera infiltré (et évaporé) ce qui donnerait une valeur d'infiltration plus proche des 20 %.
- D'autres paramètres ont une influence prévisible et logique, tels que la diminution de la hauteur du drain et l'augmentation du rayon du drain qui diminuent le volume infiltré ou la mise en place d'un débit de drainage limite qui augmente d'autant plus l'infiltration que le débit limite est faible. Fort logiquement également, l'absence de surface contributrice entraîne un débit entrant moins important, ce qui augmente la proportion du volume infiltré.
- La position horizontale du drain a une influence non négligeable sur l'infiltration. En effet le ruissellement venant exclusivement du côté gauche, si le drain est situé sur la gauche l'évacuation par le drain est favorisée puisque l'eau l'atteint plus rapidement. Inversement placer le drain à l'opposé de l'entrée du ruissellement retarde l'arrivée de l'eau au niveau du drain et favorise l'infiltration. Cette observation constitue une remarque de « bon sens » pour la conception des structures perméables.
- La lecture des résultats fait également apparaître une influence notable de la valeur de perméabilité saturée de la couche de fondation et une moins marquée de la valeur de K_s du lit de pose. Ces influences seront analysées plus en détails par la suite (3.3.1.3.a).
- L'influence de l'essai *AS_Materiaux* fait elle aussi l'objet d'une analyse spécifique (3.3.1.3.b) et n'est pas commentée ici.
- Enfin, certains paramètres ont une influence moins prévisible et moins marquée. C'est le cas de l'épaisseur du lit de pose, de la pente et de la largeur de la structure qui favorisent légèrement l'infiltration, ou de l'épaisseur de la couche de surface qui la diminue légèrement.

b. Influence des paramètres sur le stockage maximum

L'indicateur 2 permet d'entrer plus en détails dans la compréhension de l'écoulement de l'eau dans la structure en s'intéressant au stockage maximum.

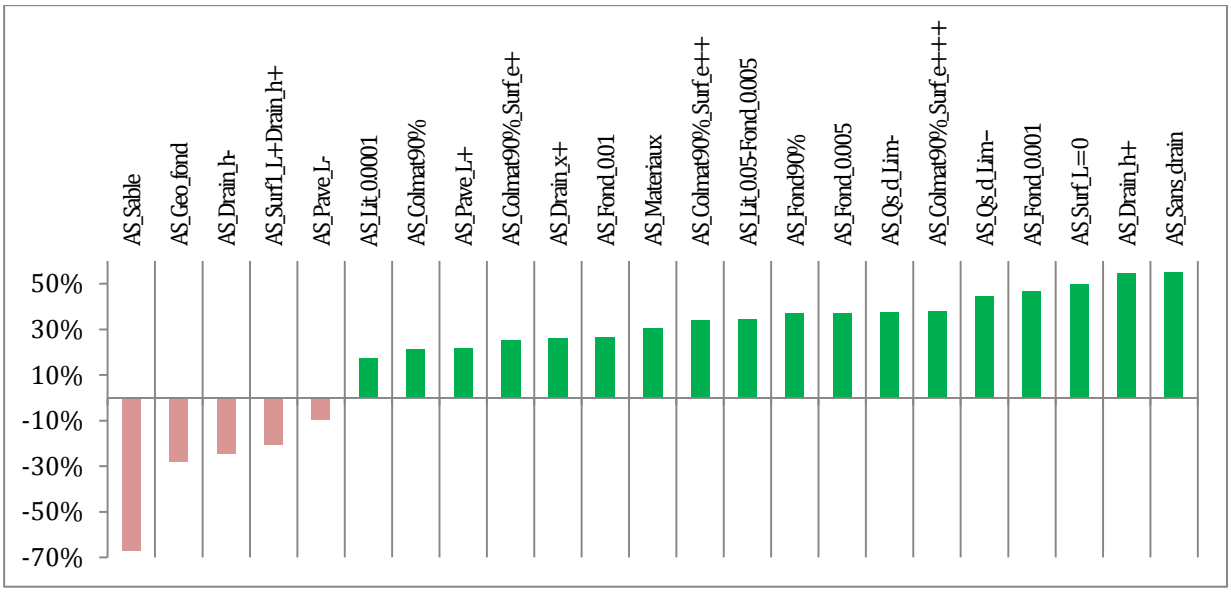


Figure 3.32 - Indicateur 2. Influence des paramètres sur le stockage maximum modélisé par le modèle *PermetAble*.

Les résultats présentés sur la Figure 3.32 sont à analyser au regard de la configuration de référence. En effet, en raison de la position du drain et de la pluviométrie utilisées pour ces essais, le niveau d'eau atteint la hauteur du drain dans quasiment toutes les simulations. Aussi les essais où la hauteur du drain est modifiée (*AS_Drain_h-, AS_Geo_fond, AS_Drain_h+* et *AS_Sans_drain*) ressortent particulièrement ici soit en diminuant le stockage (si la position du drain baisse) soit en l'augmentant (si la position du drain monte ou en l'absence de drain).

Concernant les autres résultats, la majorité se recoupe avec le graphique portant sur l'infiltration, pour les même raisons que précédemment expliqué (*AS_Sable, AS_Drain_x+, AS_Qs_d_lin-(et --)* et *AS_Surf_L=0*). Enfin, l'influence de la valeur de perméabilité saturée de la couche de fondation ressort également ici. Plus K_s de la fondation diminue plus le stockage augmente. Cette observation est liée à celle précédente sur l'infiltration.

c. *Influence des paramètres sur la dynamique temporelle*

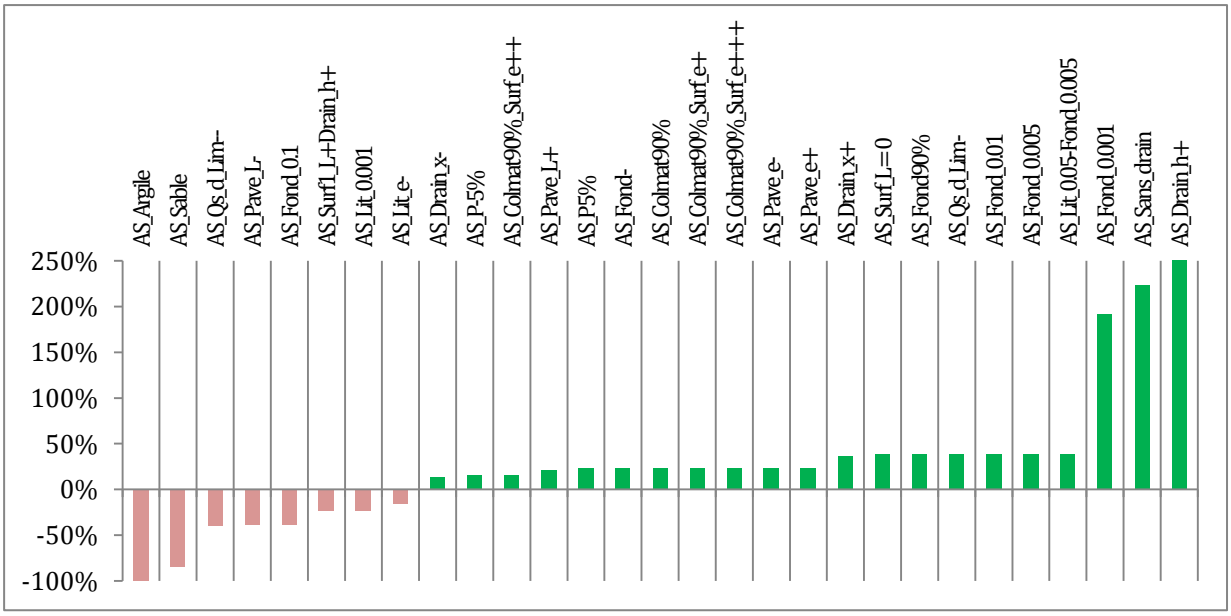


Figure 3.33 - Indicateur 3. Affichage de l'influence des paramètres sur le décalage temporel du pic de stockage.

Trois essais se détachent sur la Figure 3.33 avec une augmentation de plus de 200 % du temps de décalage entre le pic de la pluie et le pic du stockage (AS_Fond_0.001, AS_Sans_drain et AS_Drain_h+). Pour les essais sans drain ou avec un drain situé plus haut cette observation est logique et s'explique par le temps mis par l'eau pour monter à l'intérieur de la structure ; le stockage maximum étant atteint quand l'infiltration redevient supérieure au débit entrant. Le troisième essai correspond à une valeur de K_s plus faible pour la couche de fondation. L'écoulement dans la structure est alors ralenti ce qui retarde la montée de l'eau jusqu'au niveau du drain correspondant au stockage maximum.

À l'opposé, le changement de type de sol accélère dans les deux cas l'arrivée du pic de stockage (AS_Argile et AS_Sable). Dans le cas de l'argile, cette accélération est due à une moindre infiltration ce qui accélère la montée de l'eau dans la structure. Dans le cas du sable, le niveau d'eau monte très peu (2,5 cm), l'équilibre entre débit entrant et débit infiltré est rapidement atteint d'où un pic de stockage plus précoce.

d. Paramètres sans influence majeure

À la lecture des trois graphiques précédents et du Tableau 3.13 certains paramètres ne semblent pas avoir d'influence majeure sur les résultats de la modélisation :

- l'épaisseur de la couche de surface et du lit de pose. Leur influence est d'autant moins importante que la valeur de ces deux paramètres est imposée (épaisseur des pavés fixe, et taille du lit de pose comprise en 3 et 5 cm) ;
- la longueur de diffusion (de pénétration) du ruissellement. Ce qui est sécurisant puisque cette valeur varie dans la réalité en fonction de l'intensité du ruissellement alors qu'elle est fixée dans le modèle à une valeur par défaut ;
- l'augmentation de la profondeur du toit de nappe. La valeur de référence du toit de nappe à deux mètres de profondeur semble composer une valeur « seuil ». Augmenter la profondeur du toit de nappe n'influence pas de façon notable le comportement hydrologique de la structure, mais inversement la réduction de cette profondeur influence significativement les résultats du modèle. Cette observation permet de considérer pour la suite que la variation de la hauteur du toit de nappe est importante à considérer jusqu'à deux mètres de profondeur, et qu'elle a une influence moindre au-delà ;
- la répartition du ruissellement (d'un seul côté ou en provenance des deux côtés). Sauf en cas de positionnement non centré du drain, la symétrie ou non de l'origine du ruissellement ne modifie pas notablement les résultats ;
- la valeur de perméabilité des couches de surface et du lit de pose. Les essais simulant un colmatage des deux premières couches par une réduction de la valeur de K_s n'entraînent pas de modification sensible du bilan hydrologique. La diminution de K_s s'accompagne seulement d'une diffusion horizontale un peu plus marquée du ruissellement. Cette observation est vérifiée jusqu'à une diminution de 90 % de K_s, il est probable qu'une diminution plus importante conduise à une saturation empêchant l'eau d'entrer dans la structure et modifiant cette fois-ci sensiblement les résultats des processus hydrologiques.

Enfin, compte tenu de la pluie utilisée, l'influence de l'utilisation d'une valeur limite pour l'évaporation apparait peu sur les indicateurs. Ce paramètre influence néanmoins l'évaporation, la faisant passer de 10 litres sans utilisation de h_r à 5,6 litres avec $h_r = 2$ puis à 1,6 litres si $h_r = 1$.

3.3.1.3 ANALYSES SPÉCIFIQUES

a. L'influence de la perméabilité saturée (K_s) de la couche de fondation

La variation de la perméabilité saturée de la couche de fondation revient régulièrement comme l'un des paramètres qui influence le plus le comportement hydrologique de la structure. Les processus hydrologiques en sortie et le stockage maximum sont représentés sur la Figure 3.34 pour chaque valeur de K_s testée pour la couche de fondation et la Figure 3.35 qui présente les résultats de la régression linéaire pour le paramètre K_s de la couche de fondation.

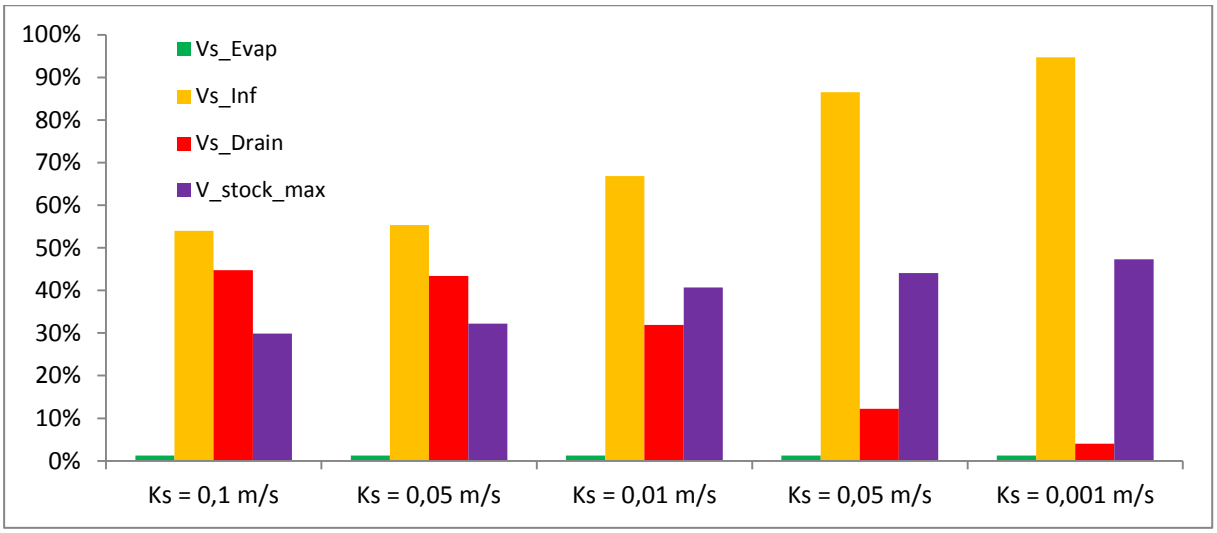


Figure 3.34 – Pourcentage du volume entrant évacué par évaporation, infiltration et par le drain et pourcentage du stockage maximum par rapport au volume entrant pour les différentes valeurs de K_s (fondation) testées.

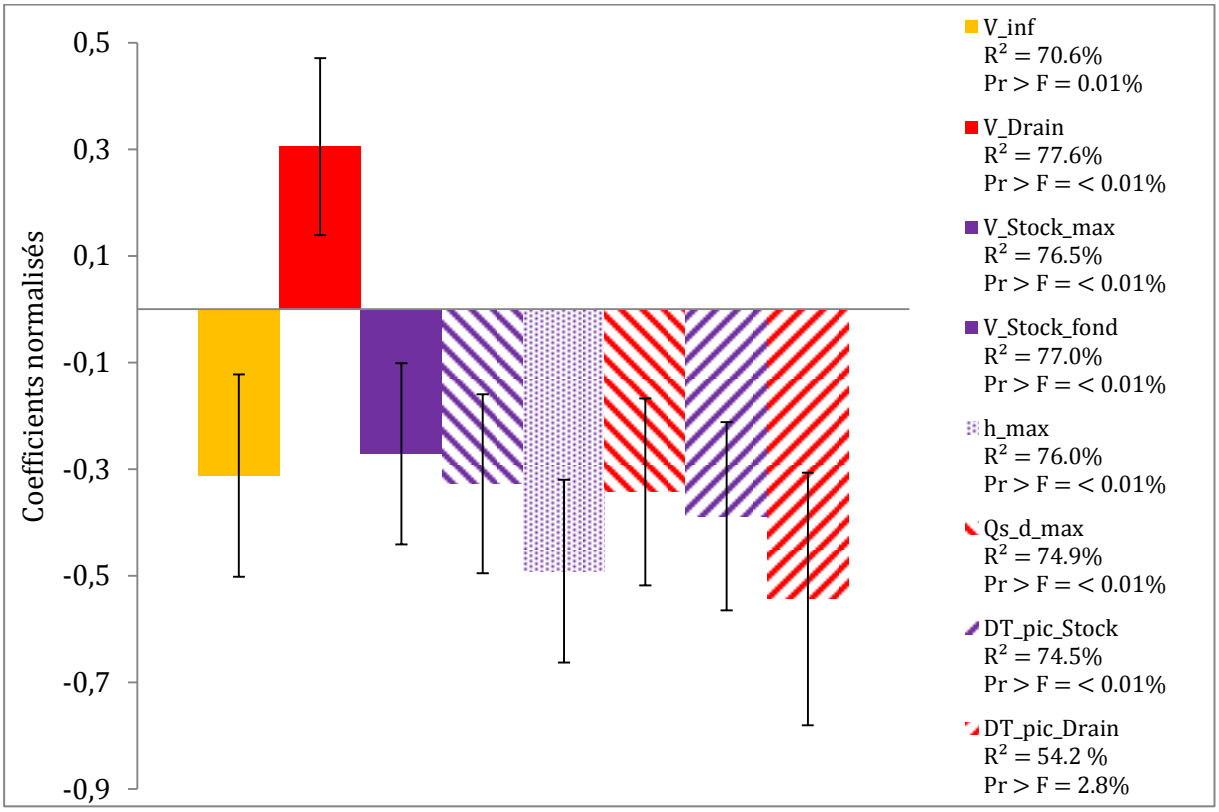


Figure 3.35 – Coefficients normalisés de K_s (fondation) pour les principaux indicateurs. Résultat issus de la régression linéaire réalisée sur l'ensemble des paramètres explicatifs et descriptifs de l'analyse de sensibilité.

Ces deux graphiques montrent qu'une diminution de la perméabilité saturée de la couche de fondation favorise l'infiltration et réduit le volume évacué par le drain. Une telle diminution augmente également le stockage maximum, notamment *via* une augmentation du stockage dans la couche de fondation, ce qui s'accompagne logiquement d'une augmentation de la hauteur d'eau maximum et d'une augmentation de la vitesse maximum d'évacuation dans le drain. Enfin, la diminution de K_s (fondation) entraîne un retard plus important du pic de stockage et de drainage. Ces résultats signifient que pour favoriser l'infiltration, il faudrait chercher à réduire la perméabilité de la couche de fondation, ce qui ne va pas de soi intuitivement.

Pour expliquer ces observations il faut tenir compte du fait que le ruissellement, qui représente près de la moitié du volume entrant, arrive par un côté du modèle sur les 20 cm supérieurs gauche de la surface. Le débit de ruissellement traverse la couche de surface et le lit de pose en les saturant partiellement (front d'infiltration relativement lent) puis percole rapidement dans la couche de fondation jusqu'au fond (front d'infiltration rapide). Si K_s (fondation) est élevé, l'infiltration dans la couche de fondation se fait exclusivement verticalement. Plus la valeur de K_s (fondation) diminue, plus l'infiltration est ralentie et va s'étaler horizontalement (Figure 3.36).

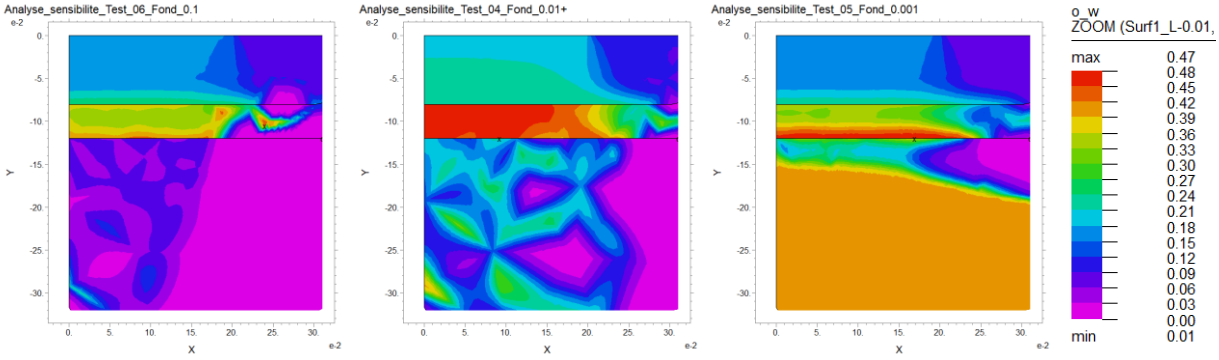


Figure 3.36 – Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation de la teneur en eau zoomée sur l'entrée du ruissellement dans la structure pour trois valeurs K_s (fondation). De gauche à droite, 0,1 m/s ; 0,01 m/s et 0,001 m/s.

Le schéma (Figure 3.37) illustre les deux situations extrêmes au moment du maximum de stockage, avec (a) K_s (fondation) = 0,1 m/s et (b) K_s (fondation) = 0,001 m/s.

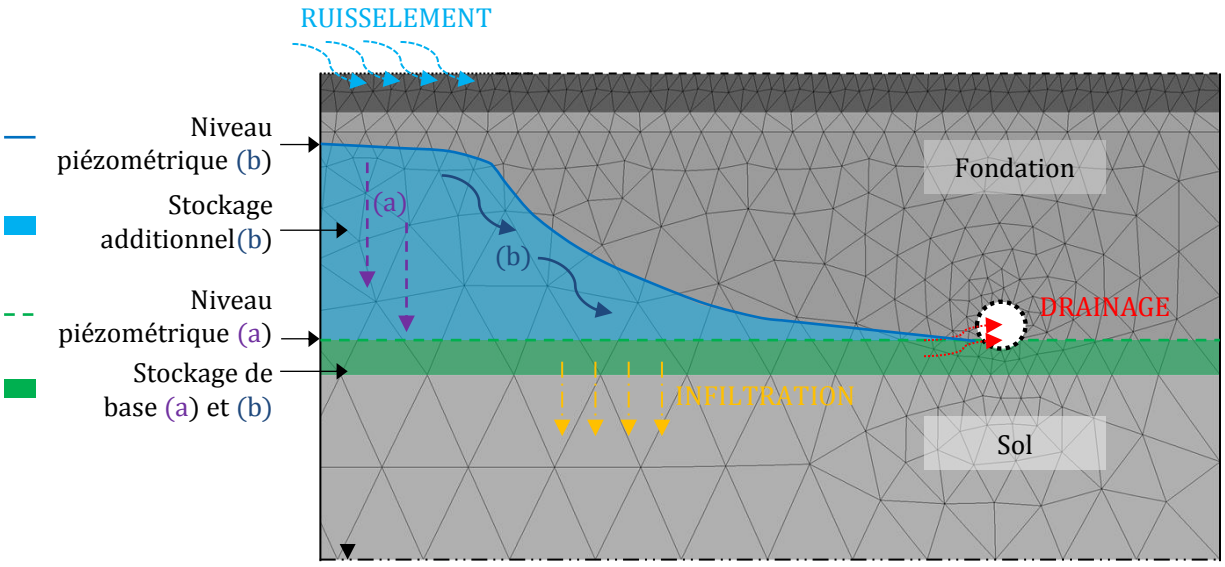


Figure 3.37 – Schéma d'illustration de l'influence de K_s (fondation) sur le stockage dans la structure au moment du pic de stockage. (a) K_s (fondation) = 0,1 m/s et (b) K_s (fondation) = 0,001 m/s

Dans les deux cas, la partie basse de la fondation (entre le fond de la structure et le bas du drain) est saturée. Dans le cas (a), la valeur de perméabilité très élevée entraîne des écoulements rapides et verticaux et donc des lignes équipotentielles de pression horizontale (niveau piézométrique (a)). Dans le cas (b), une forme de frange de rétention se met en place et les lignes équipotentielles de pression ne sont plus horizontales (niveau piézométrique (b)). Dans le cas (b), la pression hydraulique au fond de la structure et dans les premiers centimètres de sol est donc supérieure à celle du cas (a) en raison de la colonne d'eau plus importante. Cette augmentation de pression entraîne, d'après la loi de DARCY, une augmentation de la vitesse de filtration, c'est-à-dire, une augmentation de la vitesse d'infiltration vers le sol. Ce qui explique les résultats obtenus sur l'augmentation du volume total infiltré et drainé.

En conclusion, les résultats obtenus en faisant varier la valeur de K_s de la fondation soulignent l'influence de ce paramètre sur le comportement hydrologique de la structure. Une telle influence avait déjà été observée par Brunetti qui identifie K_s comme l'un des paramètres les plus influents dans la modélisation des structures perméables (Brunetti et al., 2016, 2017). Pour expliquer les résultats obtenus, il a été nécessaire de visualiser l'écoulement dans la structure dans les différentes conditions. Il apparaît alors qu'en réduisant la perméabilité de la fondation, il est possible d'augmenter le volume stocké en favorisant la rétention de l'eau dans la fondation. Cette mise en charge entraîne une augmentation de la pression hydraulique au niveau du fond de la structure et par conséquent une augmentation de la vitesse d'infiltration dans le sol. De telles observations ouvrent des perspectives pour optimiser les matériaux de construction des structures perméables. Par exemple, il pourrait s'avérer pertinent de rechercher un arrangement granulaire des graviers qui composent la couche de fondation de façon à avoir la porosité la plus importante tout en limitant leur perméabilité.

b. Influence du calage de K_{min}

Comme indiqué précédemment, l'analyse de sensibilité a été réalisée avec des paramètres de matériaux différents des paramètres finaux, après calage. Aussi un essai, *AS_Materiaux,* a été conduit après l'étape de calage, il permet de comparer la simulation de référence avec une simulation identique réalisée avec les paramètres définitifs retenus pour la caractérisation des matériaux de la structure. Le Tableau 3.13 montre que les principaux écarts de résultats entre les deux essais concernent le volume total drainé et infiltré (11,5 % de plus de volume drainé et autant de moins infiltré) et le stockage maximum avec une augmentation du stockage due en grande partie à une augmentation du stockage dans la couche de fondation. La Figure 3.38 présente l'évolution du stockage pour les deux essais et illustre les différences de dynamique et de volume stocké discutées ici.

En regardant en détails les sorties des deux simulations, il apparaît que l'essai de référence entraîne un écoulement plus rapide dans la structure, avec un temps de percolation de l'eau jusqu'au fond plus court (6 minutes contre 9), un début du drainage 1 minute plus tôt, un pic de drainage 2 minutes plus tôt et une fin de vidange de la structure bien plus rapide (68 minutes après la fin de la pluie contre 210 minutes avec les paramètres définitifs). Ces résultats sont cohérents avec les valeurs de K_{min} utilisées pour le béton drainant et les gravillons qui sont surestimées par rapport aux valeurs après calage.

Pour l'augmentation du stockage maximum et du volume drainé, l'explication est moins évidente. Il est probable que la valeur de K_{min} de la couche de fondation ($5 \cdot 10^{-5}$ m/s utilisé au lieu de $2 \cdot 10^{-5}$ m/s) explique en partie la sous-estimation du stockage maximum par une

accélération de l'écoulement et donc une diminution de la rétention. La modification de la répartition drainage/infiltration s'explique par un débit maximum moins important dans l'essai de référence (0,193 L/s contre 0,210 L/s). Le débit drainé étant directement lié à la valeur de pression interstitielle de l'eau, c'est là aussi probablement la valeur de K_{min} de la couche de fondation qui est en cause. En effet, l'accélération de l'écoulement se traduit par un aplatissement des lignes équipotentielles de pression comme cela a été mis en évidence avec l'étude de K_s. Enfin, les ajustements apportés aux valeurs des coefficients de VAN GENUCHTEN α et n entre les deux essais expliquent probablement une part des différences observées, sans que les données disponibles ne permettent de préciser l'influence propre de ces deux paramètres.

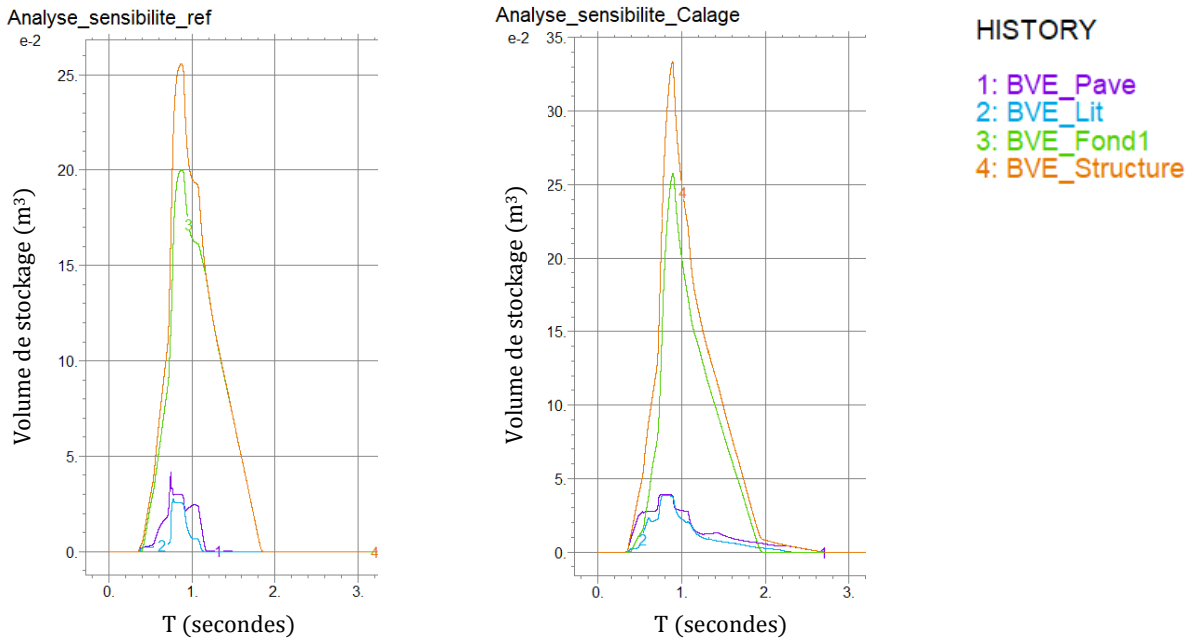


Figure 3.38 – Sorties du modèle *PermetAble*. Comparaison de l'évolution du stockage dans la structure entre l'essai de référence de l'analyse de sensibilité et l'essai avec les paramètres des matériaux après calage.

3.3.2 QUANTIFICATION DES PERFORMANCES DES STRUCTURES PERMÉABLES

Différents scénarios ont été construits pour répondre à l'objectif premier de ce modèle : la quantification des performances des structures à revêtements perméables. Comme pour l'analyse de sensibilité, les différents essais sont construits à partir d'un même scénario de référence en faisant varier un paramètre à la fois. Le choix des paramètres modifiés s'appuie sur les observations de l'analyse de sensibilité dans le but de représenter différents contextes d'utilisation. Ces essais peuvent ainsi être divisés en deux ensembles : les scénarios portant sur différents contextes de site ou de conception pour un même événement pluvieux et les scénarios portant sur une même configuration de site et de structure soumise aux différents événements climatiques identifiés dans la section 2.4.

3.3.2.1 PRÉSENTATION DES PARAMÈTRES ET DES RÉSULTATS DES SCÉNARIOS

a. Scénario de référence

Le scénario de référence a été construit pour représenter un usage « standard » des structures perméables avec des conditions de site qui ne sont ni favorables ni défavorables. La largeur de la structure a été fixée à 2 mètres, ce qui peut être faible au regard des projets réels, pour augmenter le ratio surface imperméable sur surface perméable sans pour autant modéliser des volumes d'eau trop importants.

- Géométrie :
  - structure : 2 mètres de large, pas de pente, 8 cm de pavé drainant, 4 cm de lit de pose, 50 cm de fondation, un drain de 10 cm de diamètre positionné à 20 cm du fond de la structure et au centre de la largeur, pas de géomembrane au fond ;
  - site : une surface contributrice à gauche et à droite de 5 mètres (ratio surface imperméable/surface perméable de 5), un toit de nappe situé à 2 mètres, soit une épaisseur de 1,38 mètre de sol sous la structure.
- Matériaux :
  - structure : valeur après calage (se reporter au tableau de synthèse IV.1.5) ;
  - sol : limon (se reporter au tableau de synthèse IV.1.5).
- Hydrologie :
  - pluie : événement extrême du 22 juillet 2013 (orage de 83,56 mm en 3 heures) ;
  - ETP : 2 mm/jour, soit $2{,}3 \cdot 10^{-8}$ m/s (valeur annuelle moyenne), pas de coefficient de correction, valeur limite de succion $h_r = 2$ mètres ;
  - ruissellement : longueur de pénétration du ruissellement de 50 cm, coefficient de ruissellement de 0,8 ; pas d'interception.

Les résultats de la simulation sont présentés dans le Tableau 3.14. La Figure 3.39 donne l'évolution au cours du temps du débit entrant et du débit évacué par le drain. La Figure 3.40 présente l'évolution des débits cumulés en entrée et sortie de la structure et du stockage.

Tableau 3.14 - Résultats de la simulation de référence pour la quantification des performances des RP.

Processus hydrologiques				**Stockage dans la structure**				**Décalages temporels**	
Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain
%	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*%*	*minutes*	*minutes*
0,16	57,5	42,4	0,0	28,96	2,5	2,5	24	11	9

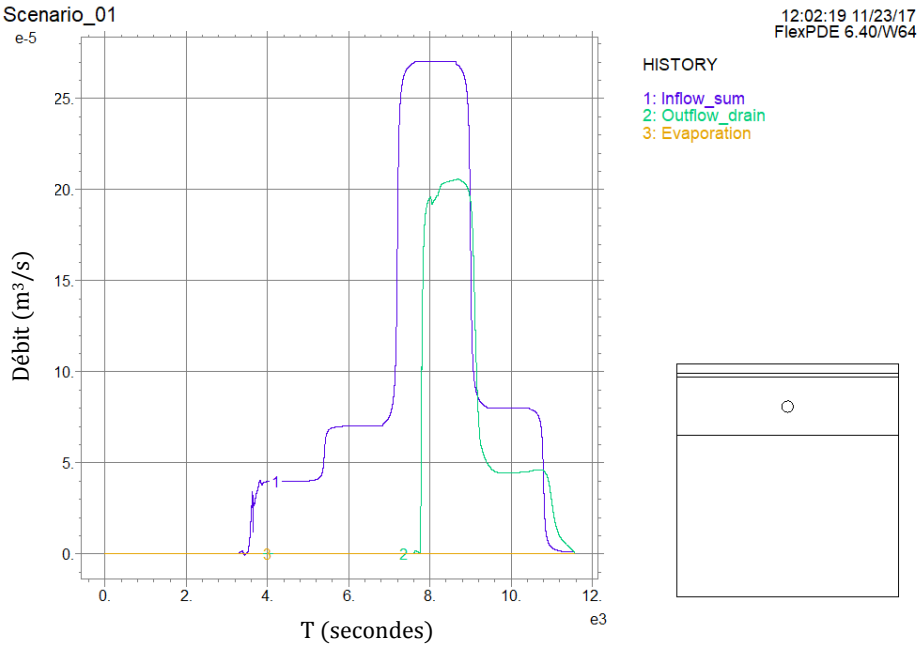


Figure 3.39 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation des débits entrants et évacués par le drain au cours du temps. Graphique exporté à la fin de la pluie (Scenario de référence).

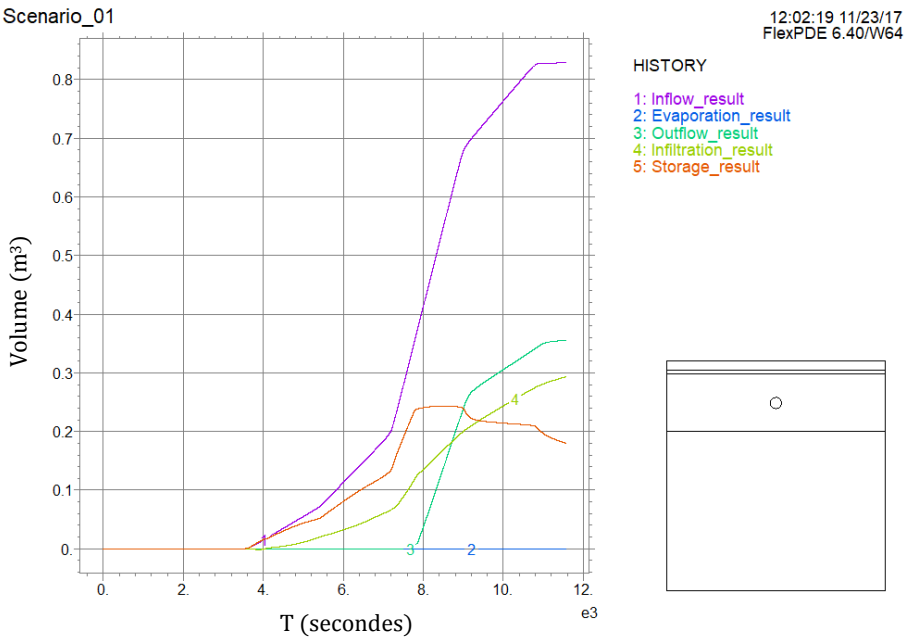


Figure 3.40 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation des débits cumulés entrant et sortant et du stockage au cours du temps. Graphique exporté à $t = 11589$ seconde (Scénario de référence).

b. Liste des scénarios et des résultats

Le premier ensemble de scénarios représente différents contextes d'utilisation ou de conception :

- type de sol : Sable, limon ou argile ;
- hauteur de toit de nappe : 2 mètres ou 1 mètre ;
- possibilité d'infiltration : oui ou non ;
- surfaces contributrices drainées : ratio surface imperméable/perméable = 5 ; 10 ou 50 ;
- drain : avec un drain au milieu, en bas, ou sans drain.

Le second ensemble de scenarios permet de décrire le fonctionnement de la structure sous différentes conditions pluviométriques rappelées dans le Tableau 3.15.

Tableau 3.15 – Liste des événements ou séries d'événements climatiques utilisés pour les différents scénarios

Événements	Pluie (mm)	Durée (heures)	Date historique	Occurrence
De référence	83,6	3	22/07/2013	PR > 100 ans
Extrême	96,6	17	25/06/2006	PR entre 20 et 50 ans
Majeur	48,2	26	13/11/2010	PR < 10 ans
Sévère	31,3	11	13/08/2011	PR < 10 ans
Occasionnel	5,2	1h18	06/07/2008	Nbr ≈ 15 par an
Courant	6,4	2h24	15/01/2008	Nbr ≈ 20 par an
Faible	4,4	2h48	17/11/2014	Nbr ≈ 25 par an
Série majeure	95,2	91 (4 j)	11-14/08/2015	Nbr ≈ 1 par an
Série occasionnelle	34,7	95 (4 j)	04-08/07/2014	Nbr ≈ 7 par an
Série courante	10	41	19-21/10/2016	Nbr ≈ 32 par an

Tableau 3.16 – Liste des scénarios modélisés et présentation des valeurs des paramètres utilisés.

Nom	Geo_f	Drain	Pave_L	Pave_P	Pave_e	Lit_e	Fond_e	Drain_h	Sol_e	Sol_Ks	Nappe_h	BV_L	Pluie	Durée pluie
	-	-	*m*	*%*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m*	*m/s*	*m*	*m*	*mm*	*heures*
Scénario Référence	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	83,56	3h
Scénario Sable	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-4}$	2	10	83,56	3h
Scénario Argile	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-9}$	2	10	83,56	3h
Scénario Imperméable	1	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,052	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	0,65	10	83,56	3h
Scénario Sans drain	0	0	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	83,56	3h
Scénario Drain bas	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,055	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	83,56	3h
Scénario Nappe haute	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	0,38	$5{\cdot}10^{-6}$	1	10	83,56	3h
Événement extrême	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	96,60	17h
Événement majeur	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	50,20	11h
Événement sévère	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	31,30	26h
Événement occasionnel	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	5,20	2h48
Événement courant	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	5,60	2h24
Événement faible	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	4,37	1h18
Série majeur	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	73,10	91h
Série occasionnelle	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	34,70	95h
Série courante	0	1	2	0	0,08	0,04	0,5	0,25	1,38	$5{\cdot}10^{-6}$	2	10	10,00	41h

Tableau 3.17 - Résultats des scénarios. Pour la colonne *Vw_y_max* les valeurs de vitesse de filtration au-dessus du seuil de validité de l'hypothèse de modélisation ($Vw\_y\_max < 1 \cdot 10^{-4}$) sont indiquées en rouge.

Nom	Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain	h_max	Vw_y_max
				% du volume total entré dans la structure					*min*	*min*	*m*	*m/s*
Scénario Référence	0,16	57,45	42,39	0,00	28,96	2,47	2,48	24,01	11,0	9,0	0,21	$8{,}5 \cdot 10^{-3}$
Scénario Sable	0,15	99,85	0,00	0,00	10,48	2,53	2,55	5,39	13,3	-	0,00	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$
Scénario Argile	0,19	1,26	74,00	24,55	29,31	2,50	2,51	24,30	10,8	3,3	0,21	$5{,}6 \cdot 10^{-3}$
Scénario Imperméable	0,20	0,00	98,62	1,13	15,45	2,47	2,49	10,53	13,3	-	0,03	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$
Scénario Sans drain	0,20	99,84	0,00	0,00	47,82	2,47	2,49	44,62	40,0	-	0,46	$6{,}0 \cdot 10^{-3}$
Scénario Drain bas	0,14	14,18	85,68	0,00	14,12	2,47	2,49	9,20	13,3	8,3	0,06	$8{,}0 \cdot 10^{-3}$
Scénario Nappe haute	0,16	52,90	46,94	0,00	29,37	2,47	2,49	24,42	11,6	8,3	0,21	$5{,}3 \cdot 10^{-3}$
Événement extrême	0,20	79,89	19,91	0,00	23,14	1,78	1,68	19,69	1,0	1,00	0,21	$7{,}0 \cdot 10^{-3}$
Événement majeur	0,36	99,64	0,00	0,00	9,28	2,30	1,80	5,99	1,0	-	0,04	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$
Événement sévère	0,38	99,62	0,00	0,00	19,55	3,85	3,17	14,10	5,8	-	0,05	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$
Événement occasionnel	2,12	97,88	0,00	0,00	61,55	26,54	16,35	24,24	3,0	-	0,04	$6{,}3 \cdot 10^{-3}$
Événement courant	1,97	98,03	0,00	0,00	24,64	15,89	8,93	3,39	8,0	-	0,01	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$
Événement faible	2,54	97,46	0,00	0,00	29,77	19,92	9,39	0,46	21,7	-	0,00	$2{,}0 \cdot 10^{-5}$
Série majeur	1,31	98,69	0,00	0,00	13,13	1,16	1,05	10,92	1,0	-	0,11	$5{,}0 \cdot 10^{-3}$
Série occasionnelle	2,59	97,41	0,00	0,00	5,75	3,14	1,99	1,28	6,7	-	0,00	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$
Série courante	3,63	96,37	0,00	0,00	12,19	7,66	4,63	0,10	1,7	-	0,00	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.18 - Résultats des scénarios comparés à l'essai de référence (Résultat essai – résultat référence). La coloration des cellules est proportionnelle à leur valeur, en vert de plus en plus foncé pour les valeurs positives et en rouge de plus en plus foncé pour les valeurs négatives.

Nom	Vs_Evap	Vs_Inf	Vs_Drain	V_Stock_fin	V_Stock_max	V_Pave_max	V_Lit_max	V_Fond_max	DT_Pic_Stock	DT_Pic_Drain	h_max
	% du volume total entré dans la structure								*min*	*min*	*m*
Scénario Référence	0,16	57,45	42,39	0,00	28,96	2,47	2,48	24,01	11,00	9,00	0,21
Scénario Sable	-0,01	42,40	-42,39	0,00	-18,48	0,06	0,07	-18,62	2,33	-9,00	-0,21
Scénario Argile	0,03	-56,19	31,61	24,55	0,35	0,03	0,03	0,29	-2,50	3,33	0,21
Scénario Imperméable	0,04	-57,45	56,23	1,13	-13,51	0,00	0,01	-13,48	2,50	-3,33	-0,19
Scénario Sans drain	0,04	42,39	-42,39	0,00	18,86	0,00	0,01	20,61	26,67	0,00	0,44
Scénario Drain bas	-0,02	-43,27	43,29	0,00	-14,84	0,00	0,01	-14,81	-26,67	8,33	-0,40
Scénario Nappe haute	0,00	-4,55	4,55	0,00	0,41	0,00	0,01	0,41	-1,67	0,00	0,15
Événement extrême	0,04	22,44	-22,48	0,00	-5,82	-0,69	-0,80	-4,32	-4,83	1,00	0,16
Événement majeur	0,20	42,19	-42,39	0,00	-19,68	-0,17	-0,68	-18,02	-20,67	0,00	0,04
Événement sévère	0,22	42,17	-42,39	0,00	-9,41	1,38	0,69	-9,91	4,83	0,00	0,01
Événement occasionnel	1,96	40,43	-42,39	0,00	32,59	24,07	13,87	0,23	-8,67	-8,33	-0,17
Événement courant	1,81	40,58	-42,39	0,00	-4,32	13,42	6,45	-20,62	5,00	0,00	-0,03
Événement faible	2,38	40,01	-42,39	0,00	0,81	17,45	6,91	-23,55	13,67	0,00	-0,01
Série majeur	1,15	41,24	-42,39	0,00	-15,83	-1,31	-1,43	-13,09	-5,67	0,00	0,11
Série occasionnelle	2,43	39,96	-42,39	0,00	-23,21	0,67	-0,49	-22,73	5,00	0,00	0,00
Série courante	3,47	38,92	-42,39	0,00	-16,77	5,19	2,15	-23,91	0,67	-1,00	-0,21

3.3.2.2 ANALYSE DU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

a. Quantification des performances

Les résultats du scénario de référence (Tableau 3.14, Figure 3.39 et Figure 3.40) donnent une première quantification des performances des revêtements perméables. Dans les conditions qui sont celles retenues pour ce scénario de référence, la structure perméable permet l'infiltration de 57,5 % du volume d'eau engendré par une pluie d'occurrence centennale (soit 476 litres). Le volume évacué par drainage représente quant à lui 42,4 % du volume entrant (soit 361 litres). La structure permet donc un abattement de plus de la moitié du volume qui aurait ruisselé dans les mêmes conditions sur une surface imperméable.

Dans l'hypothèse où il n'y a pas de saturation du drain, il n'y a pas non plus de débordement de l'eau dans la structure. Le niveau d'eau maximum atteint correspond au bas du drain, il reste donc inférieur à la moitié de la hauteur de la couche de fondation.

La structure stocke au maximum 29 % de l'eau entrante (soit 243 litres). Ce stockage s'effectue principalement par saturation du bas de la couche de fondation (201 litres) mais également par rétention dans les deux couches de surfaces (béton drainant et gravillon), à raison de 21 litres dans chacune de ces couches. Le pic de stockage est atteint environ 11 minutes après le pic de pluie. Cette temporisation assez courte s'explique par la forme symétrique de la pluie qui conduit à une montée en charge progressive de l'eau dans la structure. À la fin de la pluie, le stockage dans la structure est de 155 litres (Figure 3.40), ce volume est drainé en moins de 6 heures (5 heures et 20 minutes). Le respect d'une vidange en moins de 24 heures ou 48 heures régulièrement demandée pour un événement de cette occurrence est donc largement atteint dans le contexte de l'essai.

Ces observations soulignent que dans les conditions de l'essai de référence, donc avec un événement climatique centennal, les revêtements perméables apportent une contribution significative à la gestion des eaux de ruissellement tout en assurant l'évacuation de l'eau sans mise en charge excessive de la structure et avec un temps de vidange inférieur au maximum demandé pour ce type d'ouvrage. Cependant près de la moitié du volume d'eau entrant dans la structure est évacuée par le drain, donc soit vers le réseau d'eau pluviale soit vers un autre ouvrage. Les différents scénarios testés vont permettre d'évaluer les performances des structures perméables dans un contexte et avec des choix de conception différents. La suite de cette section explore ces différences et leurs conséquences en termes d'usages des revêtements perméables.

b. Étude de la dynamique des processus hydrologiques

Comme souligné ci-dessus, le stockage de l'eau dans la structure s'effectue selon deux mécanismes : la rétention et le stockage à saturation. Ces deux phénomènes interviennent dans une dynamique différente qu'il est intéressant d'étudier en vue de produire une modélisation simplifiée du comportement des revêtements perméables.

La Figure 3.41 présente l'évolution du stockage dans la structure sur l'ensemble de la pluie et de la période de vidange. Ce graphique met en évidence que la majorité du stockage est assurée par saturation de la couche de fondation. Il confirme également que la courbe de vidange dépend directement de la perméabilité du sol. La pente de la vidange du volume total stocké dans la structure peut être représentée par une droite d'équation $Volume(L) = -0{,}47 \cdot t(min) + 257$

avec un R^2 de 0,99 (Figure 3.41). La largeur de la structure étant de 2 mètres cela correspond à une perméabilité de $3{,}9 \cdot 10^{-6}$ m/s soit proche de la perméabilité du sol ($K_s = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s). À noter que la vidange des couches de surface (béton drainant et lit de pose) intervient dans la même temporalité que celle de la fondation, ce qui souligne que ces deux couches sont majoritairement vidées par écoulement de l'eau vers la fondation puis infiltration de l'eau et non par évaporation.

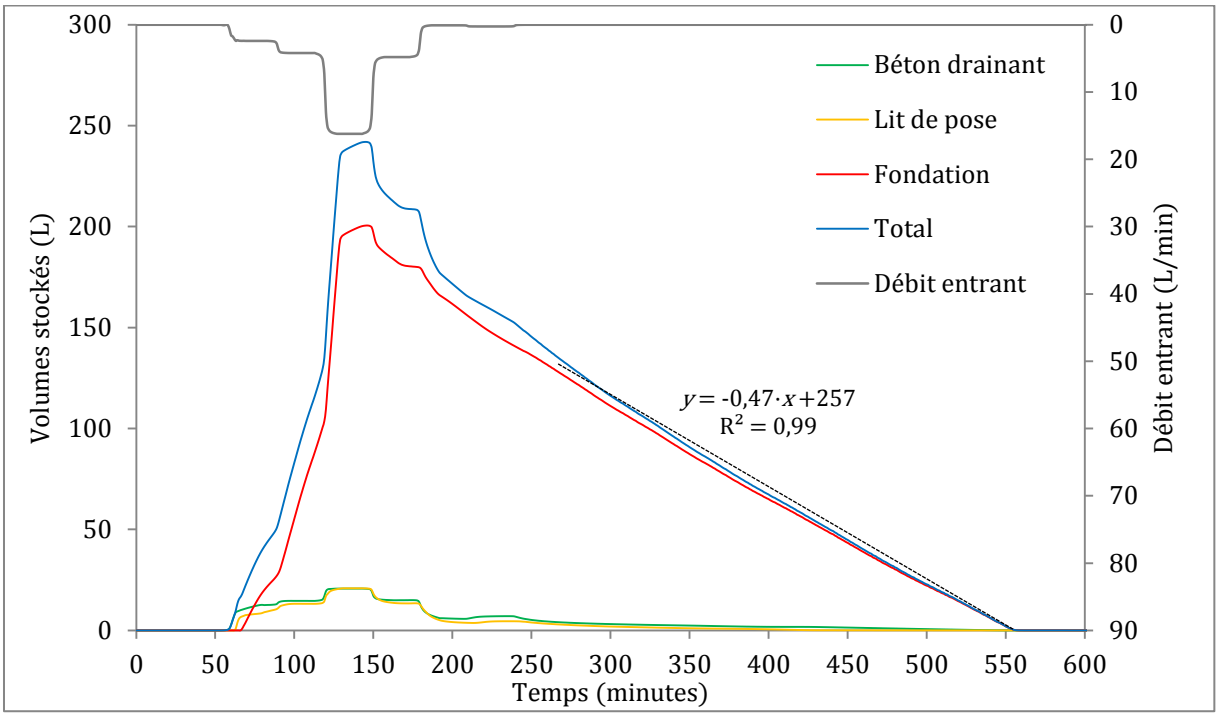


Figure 3.41 - Graphique d'évolution des volumes stockés dans la structure et du débit entrant en fonction du temps (Scénario de référence).

La Figure 3.42 présente les mêmes résultats, zoomés sur la période allant du début au pic de la pluie. Cette visualisation illustre la progression du front d'infiltration dans la structure au début de la pluie. L'eau entrante est d'abord stockée par rétention dans le béton drainant, puis progresse vers le lit de pose (environ 5 minutes après le début de la pluie) et enfin atteint la fondation (environ 8 minutes après le début de la pluie).

Ce graphique montre également que le stockage dans les couches de surface a principalement lieu au début de la pluie (volume stocké de respectivement 11 et 10 litres pour la couche de béton drainant et le lit de pose à la fin du premier palier de pluie). Il ne s'agit pas pour autant d'un stockage de type seuil où l'écoulement n'aurait lieu que quand une valeur de stockage est atteinte. En effet, ce stockage continue d'évoluer lors des changements de débit entrant alors qu'un écoulement vers la fondation a déjà lieu. Cette observation souligne que ce stockage intervient par rétention d'une certaine quantité d'eau, qui dépend du débit entrant, qui est ralentie dans son écoulement.

Cette observation peut être approfondie avec la Figure 3.43 qui montre la teneur en eau dans la structure, au moment du pic de la pluie. La teneur en eau atteinte est respectivement de 0,13 et 0,27 pour le béton drainant et le lit de pose, soit un coefficient de saturation d'environ 56 % pour les deux matériaux. Ces valeurs confirment que le stockage de l'eau dans ces deux couches est composé en partie d'eau fortement liée à la matrice solide et également, en majorité, d'un volume d'eau plus libre qui peut s'écouler par gravité.

Enfin, la Figure 3.44 présente le profil de teneur en eau le long de la coupe n°1 à la fin de la pluie. Sur ce graphique, un pic de teneur en eau est visible au bas de la couche de béton perméable et au bas du lit de pose. Cette observation permet de préciser le constat précédent en soulignant l'influence des interfaces sur le stockage de l'eau par rétention. Il est fort probable que la présence d'un géotextile au bas du lit de pose (non modélisé ici) renforce ce phénomène de rétention et conduise à un volume stocké plus important dans le lit de pose.

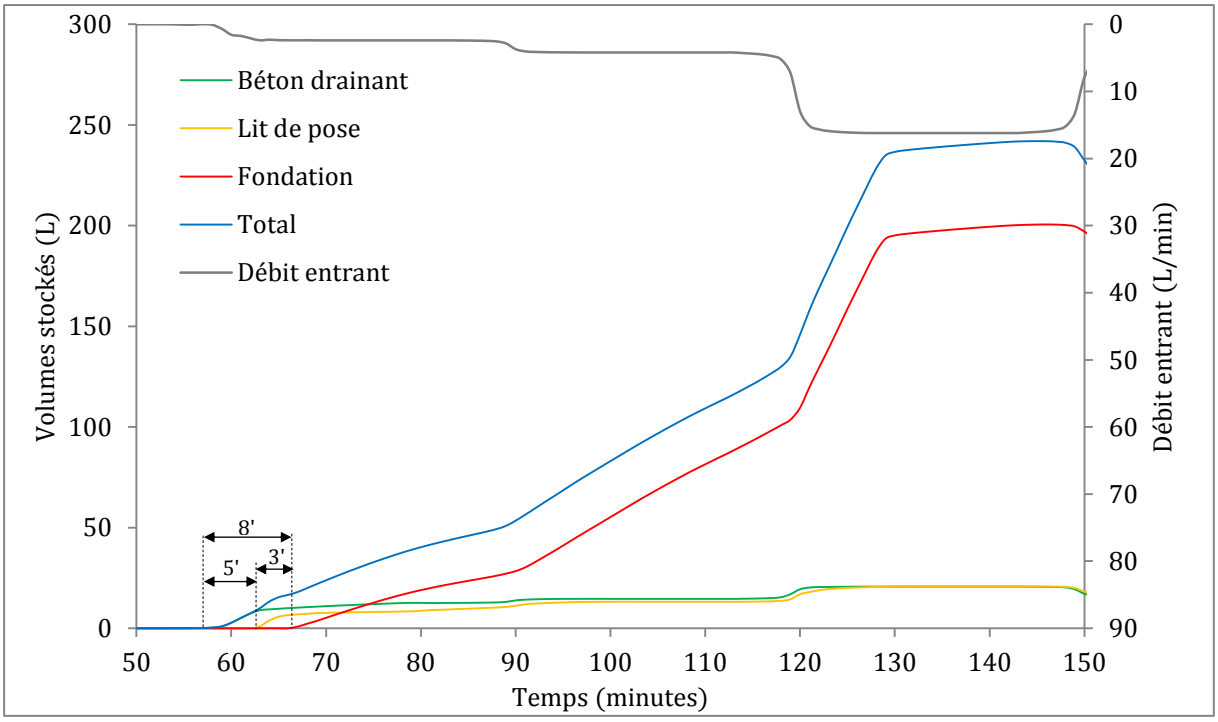


Figure 3.42 - Graphique d'évolution des volumes stockés dans la structure et du débit entrant en fonction du temps. Zoom du début au pic de la pluie (Scénario de référence).

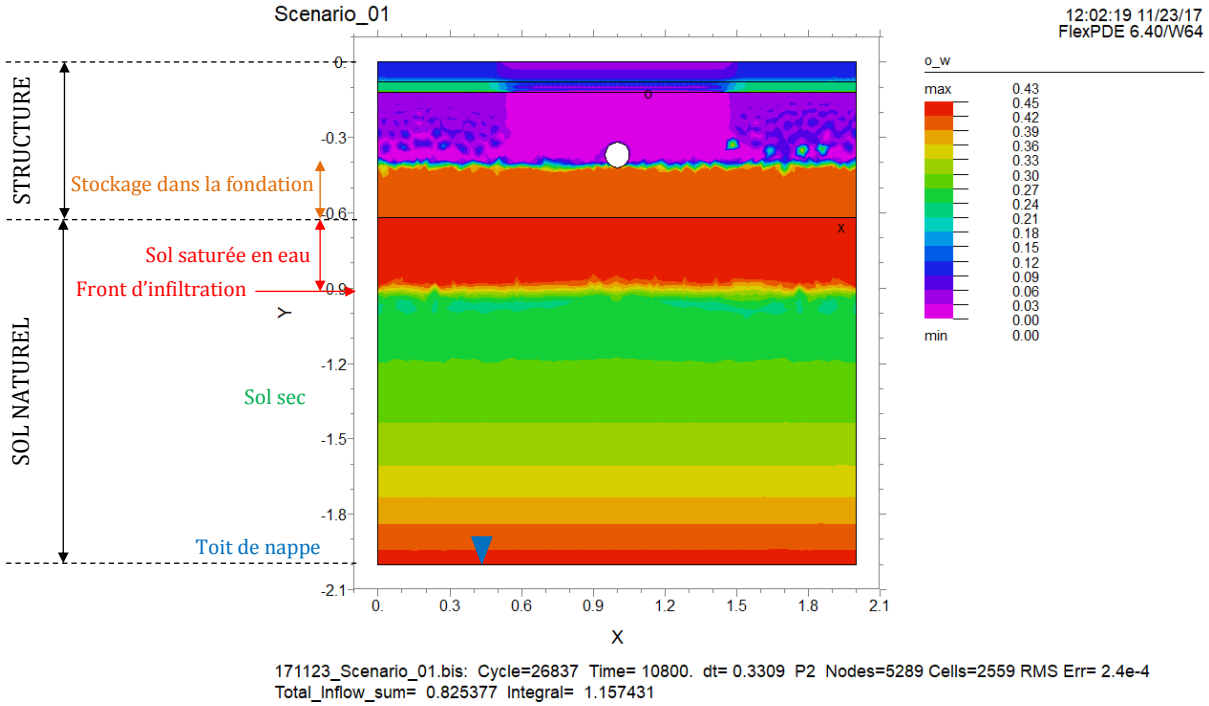


Figure 3.43 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de la teneur en eau sur l'ensemble du domaine de modélisation au moment du pic de pluie (Scénario de Référence).

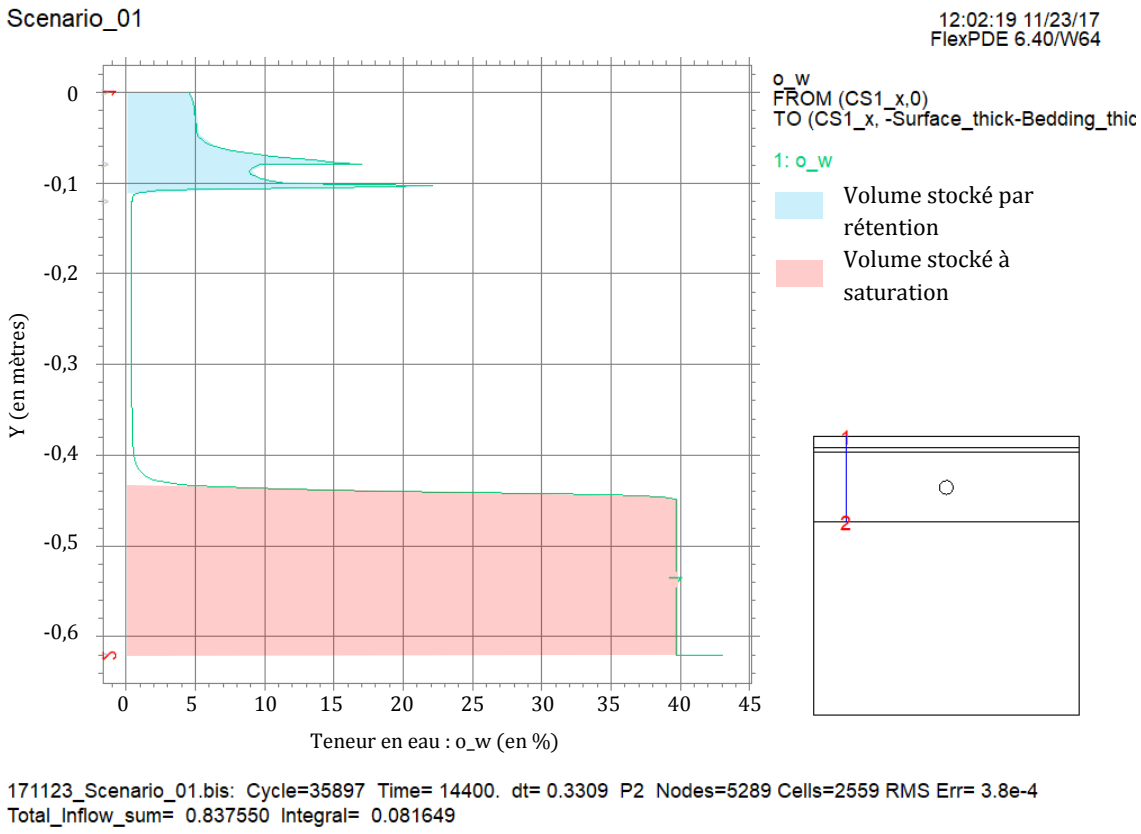


Figure 3.44 - Sortie du modèle *PermetAble*. Profil de teneur en eau dans la structure le long de la coupe n°1. Visualisation des volumes d'eau stockés par rétention (couches de surface) et par saturation (fondation).

La visualisation de la teneur en eau dans la structure (Figure 3.43) permet également de préciser que, contrairement aux deux couches de surface, l'eau est très peu retenue par rétention dans la fondation et s'écoule presque directement jusqu'au fond de la structure. En effet, les propriétés hydrogéologiques des graviers ne permettent pas la mise en place d'un front d'infiltration visible, la bascule d'un état sec et non perméable à un état humidifié et très perméable est quasiment immédiate. Cette bascule est clairement visible sur le profil de teneur en eau (Figure 3.44) avec un passage presque vertical d'une teneur en eau très faible à la teneur en eau saturée (ce qui correspond à la zone de transition au-dessus de la zone saturée).

Enfin, à noter que la Figure 3.43 permet de visualiser également le front d'infiltration dans le sol avec un front très net situé à -0,9 mètre au moment du pic de pluie.

En conclusion, il apparaît que l'entrée de l'eau dans la structure entraîne dans un premier temps un front d'infiltration dans la couche de béton drainant puis dans le lit de pose. Après un certain temps de temporisation, correspondant à un volume de stockage par rétention qui dépend du débit entrant, le front d'infiltration atteint le haut de la couche de fondation et l'eau s'écoule alors rapidement jusqu'au fond de la structure où elle s'accumule (si le débit entrant est supérieur au débit d'infiltration dans le sol). Lors de la vidange, le volume d'eau stocké dans la fondation diminue en fonction de la perméabilité du sol. Le volume d'eau stocké par rétention dans les couches de surface est également principalement évacué par écoulement gravitaire, vers la fondation (et ce avant même la fin de la pluie, Figure 3.41). Les résultats des scénarios avec des contextes ou des conceptions différents vont permettre de préciser ces observations. La synthèse des enseignements est présentée dans la conclusion de ce chapitre.

3.3.2.3 ANALYSE DES SCÉNARIOS PORTANT SUR LE CONTEXTE D'UTILISATION OU LA CONCEPTION

Les tableaux 3.17 et 3.18 donnent un aperçu des résultats pour l'ensemble des scénarios modélisés. Ici, les résultats des scénarios « Sable », « Argile », « Imperméable », « Sans drain », « Drain bas » et « Nappe haute » sont comparés entre eux et avec l'essai de référence. Cette comparaison est détaillée par processus hydrologique pour analyser leur importance et leur dynamique et expliquer les écarts constatés. Cette comparaison s'appuie sur des graphiques de comparaison de l'évolution dans le temps des débits cumulés pour les différents scénarios.

a. Évaporation

Compte tenu de la configuration de l'essai, l'évaporation est négligeable au regard des autres processus. Cependant, l'étude des débits évaporés cumulés pour chaque essai, présentée sur la Figure 3.45 , permet d'observer les mécanismes favorisant l'évaporation.

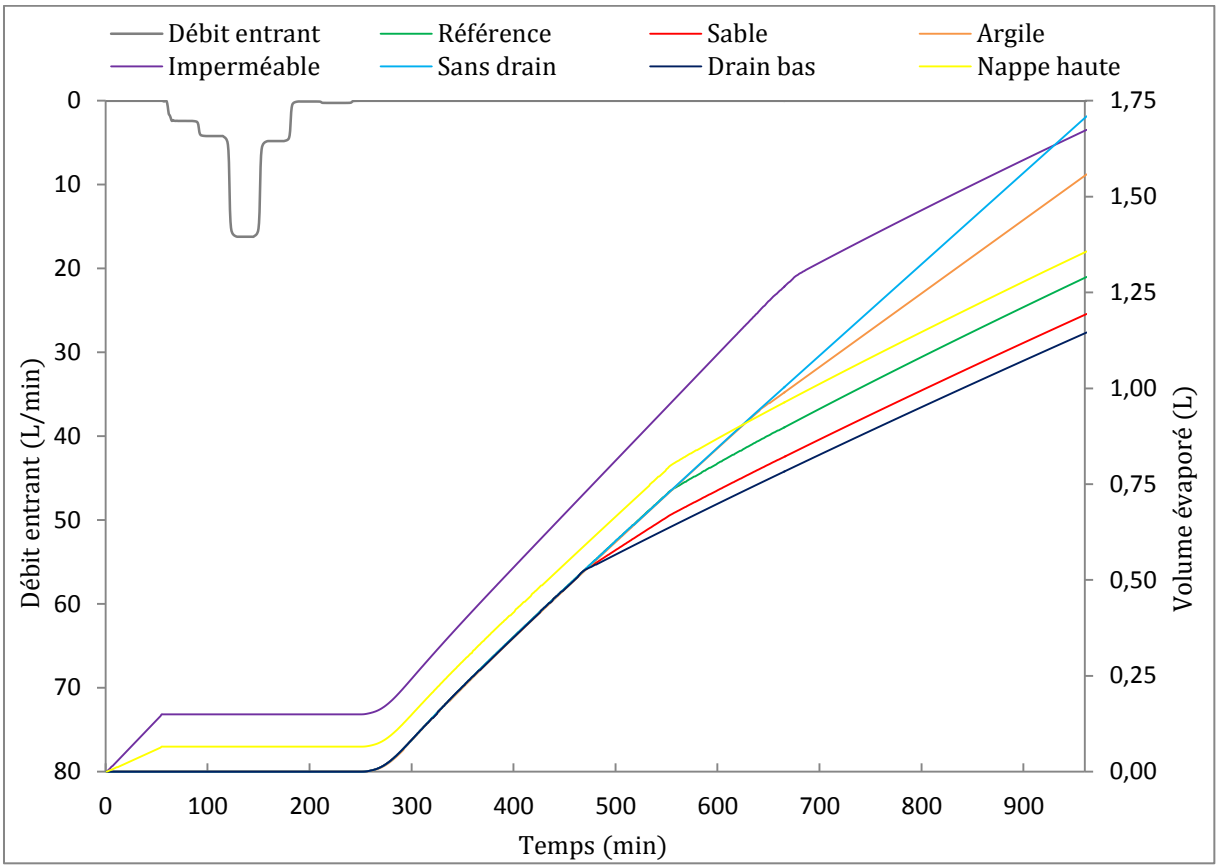


Figure 3.45 – Évolution du volume évaporé (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios.

- Seuls deux essais, celui avec un fond imperméable et celui avec un nappe haute, présentent une évaporation au début de la simulation, avant la pluie. Cette différence avec l'ensemble des autres essais s'explique par la valeur de teneur en eau initiale dans la structure. En effet, la valeur initiale de h suit une droite décroissante en partant de $h = 0$ au fond de la structure et avec une valeur la plus faible en surface. Dans les deux essais en question, le fond de la structure étant plus proche de la surface, la valeur initiale de h en surface est supérieure au paramètre h_r (fixé à -2 mètres) donc une évaporation est simulée par le modèle. Ces écarts du début de simulation sont ainsi avant tout une conséquence d'un choix de modélisation.

- Après la fin de la pluie, le volume évaporé augmente dans un premier temps avec un débit constant avant de s'infléchir (diminution du débit d'infiltration). Cette inflexion a lieu dans tous les essais, au moment de la vidange complète de l'eau gravitaire dans la structure. Cette vidange arrive plus ou moins tôt en fonction des essais (Figure 3.48). Trois essais ne présentent pas de vidange complète ce qui se traduit par : l'absence d'inflexion pour l'essai sans drain, une inflexion tardive pour l'essai imperméable, et une inflexion très faible pour l'essai avec un sol argileux :
    - pour l'essai imperméable, cela peut s'expliquer par l'observation faite lors du calage du modèle. En effet, il apparaissait alors qu'une fine lame d'eau reste piégée au fond de la structure sans pouvoir être évacuée par le drain. La valeur h au fond de la structure reste donc autour de 0 ce qui ralentit l'écoulement dans la structure. La pression interstitielle diminue donc plus lentement dans l'ensemble de la structure, donc dans la couche de surface, ce qui favorise l'évaporation ;
    - lors de l'essai sans drain, le niveau d'eau monte plus haut dans la structure (h_{max} = 46 cm, soit 4 cm seulement sous le niveau du lit de pose) et son évacuation est plus lente puisqu'elle est seulement assurée par infiltration (Figure 3.48). En favorisant le stockage dans la structure, cet essai augmente la quantité d'eau disponible en surface et favorise l'évaporation ;
    - dans le cas de l'essai « argile », l'eau stockée dans la couche de fondation s'évacue très lentement, à la fin de l'essai une hauteur de 20 cm d'eau est encore présente dans la fondation. Cependant, le drainage des couches de surface est plus avancé que dans le cas précédent, l'eau disponible diminue, ce qui conduit à légèrement infléchir le débit évaporé.

Ces deux observations sont largement influencées par le choix de modélisation de l'évaporation. Cependant, malgré leur écart probable à la réalité, les résultats obtenus mettent en évidence que l'évaporation dépend majoritairement de la quantité d'eau disponible dans les deux couches de surface et très peu de l'eau présente dans la couche de fondation. En effet, l'évaporation est plus importante à la fin de l'essai sans drain que dans celui avec un sol argileux alors que ce dernier possède un volume stocké dans la fondation plus important. Favoriser l'évaporation revient ainsi à chercher à favoriser la rétention de l'eau dans le béton drainant et dans le lit de pose.

b. Infiltration

L'infiltration est l'un des deux processus hydrologiques d'évacuation de l'eau majeurs de l'essai de référence (avec le drainage). La Figure 3.46 permet de visualiser à la fois le volume total infiltré à la fin de l'essai et la temporalité avec laquelle l'infiltration a lieu.

Les observations faites lors de l'analyse de sensibilité se retrouvent sur la Figure 3.46 avec logiquement une infiltration maximum pour un sol sableux, suivi du scénario sans drain. À l'opposé une infiltration nulle si le fond est imperméable et faible voire presque nulle pour une structure avec un drain bas ou un sol argileux[18]. La hauteur de nappe influence légèrement l'infiltration en la réduisant un peu par rapport au scénario de référence en raison de la teneur en eau un peu plus élevée dans le sol.

[18] En considérant le volume infiltré non pas 12 heures après la fin de la pluie mais à la fin du temps de vidange le volume infiltré sans drain serait égal à celui avec un sol sableux. De la même façon, celui de l'essai avec un sol argileux serait non pas de 10,5 litres mais de 170 litres environ, même si dans le cas de l'argile ce calcul n'a que peu de sens au regard du temps qui serait nécessaire pour cette infiltration.

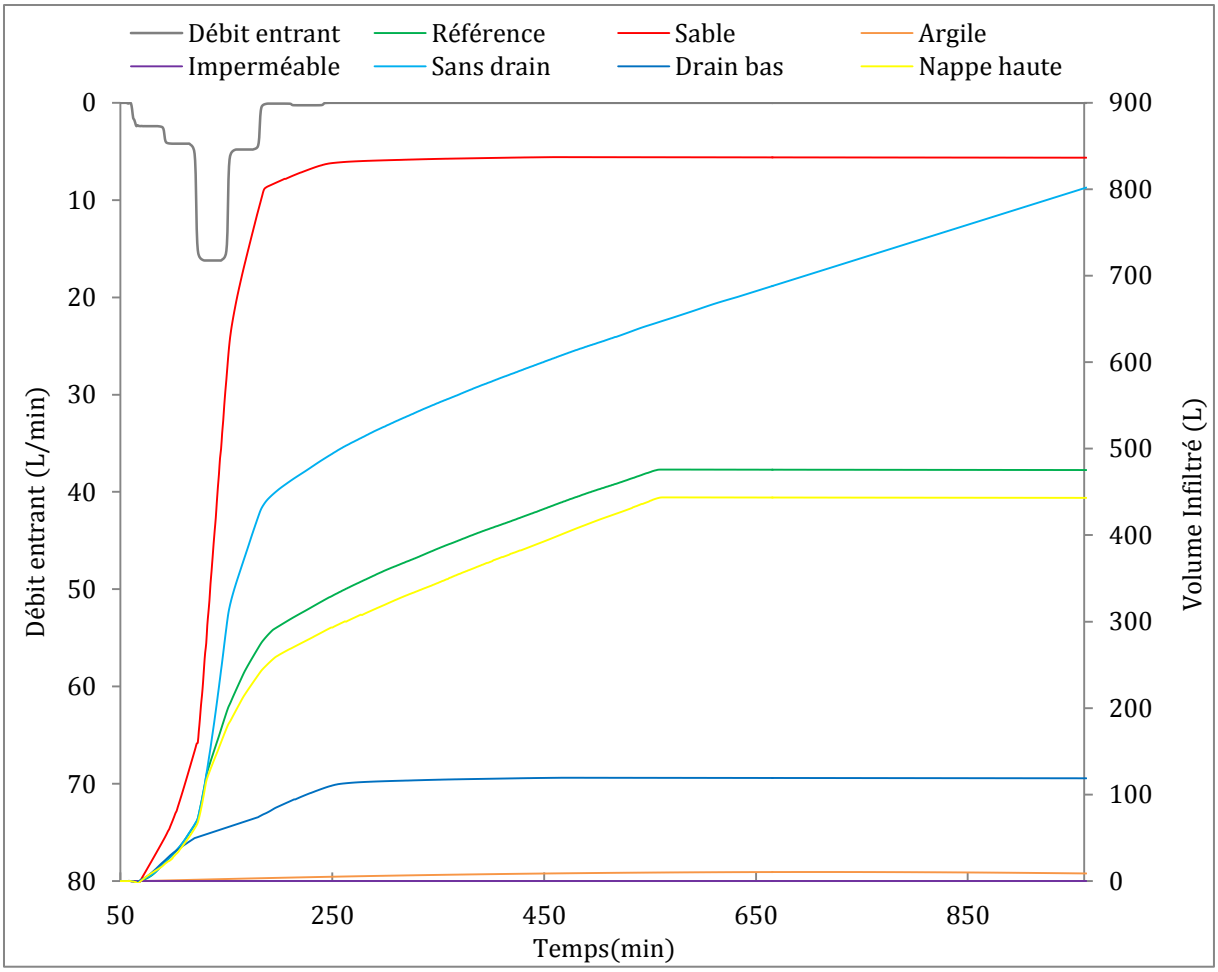


Figure 3.46 - Évolution du volume infiltré (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios.

Au niveau de la dynamique, une inflexion du débit d'infiltration s'observe pour chaque essai au moment de la fin de la pluie. L'infiltration est alors seulement alimentée par le volume d'eau gravitaire présent dans la structure. À partir de ce point d'inflexion, le débit d'infiltration décroît doucement à mesure que le niveau d'eau baisse dans la structure.

La durée d'infiltration est principalement influencée par la perméabilité du sol support et le volume total stocké dans la structure (principalement influencé par la position du drain). Dans le cas d'un sol de perméabilité supérieure à $5 \cdot 10^{-6}$ m/s, ce temps de vidange est inférieur ou proche de 12 heures. En revanche avec un sol de perméabilité inférieure, le temps de vidange est largement supérieur à 12 heures. Dans le cas de l'essai avec un sol argileux, le temps nécessaire à l'infiltration des 162 litres restant à la fin de la simulation serait de plusieurs dizaines de jours.

c. Drainage

L'étude du débit drainé (Figure 3.47) donne des observations corrélées aux résultats de l'infiltration. Les scénarios sans drain ou avec un sol sableux ne présentent aucun volume drainé alors que les autres scénarios entraînent un débit drainé supérieur à celui de référence.

Au niveau de la dynamique, le début du drainage est systématiquement décalé par rapport au début de l'événement pluvieux. Il intervient entre 66 et 70 minutes après le début de la pluie sauf pour les deux scénarios où le drain est situé plus proche du fond de la structure. Ce retard

est directement lié au temps nécessaire pour que l'eau stockée dans la couche de fondation atteigne le bas du niveau du drain. Une fois commencé, le drainage se produit majoritairement pendant la durée de la pluie et se termine rapidement à la fin de l'événement pluvieux ce qui souligne la vitesse d'écoulement de l'eau dans la structure.

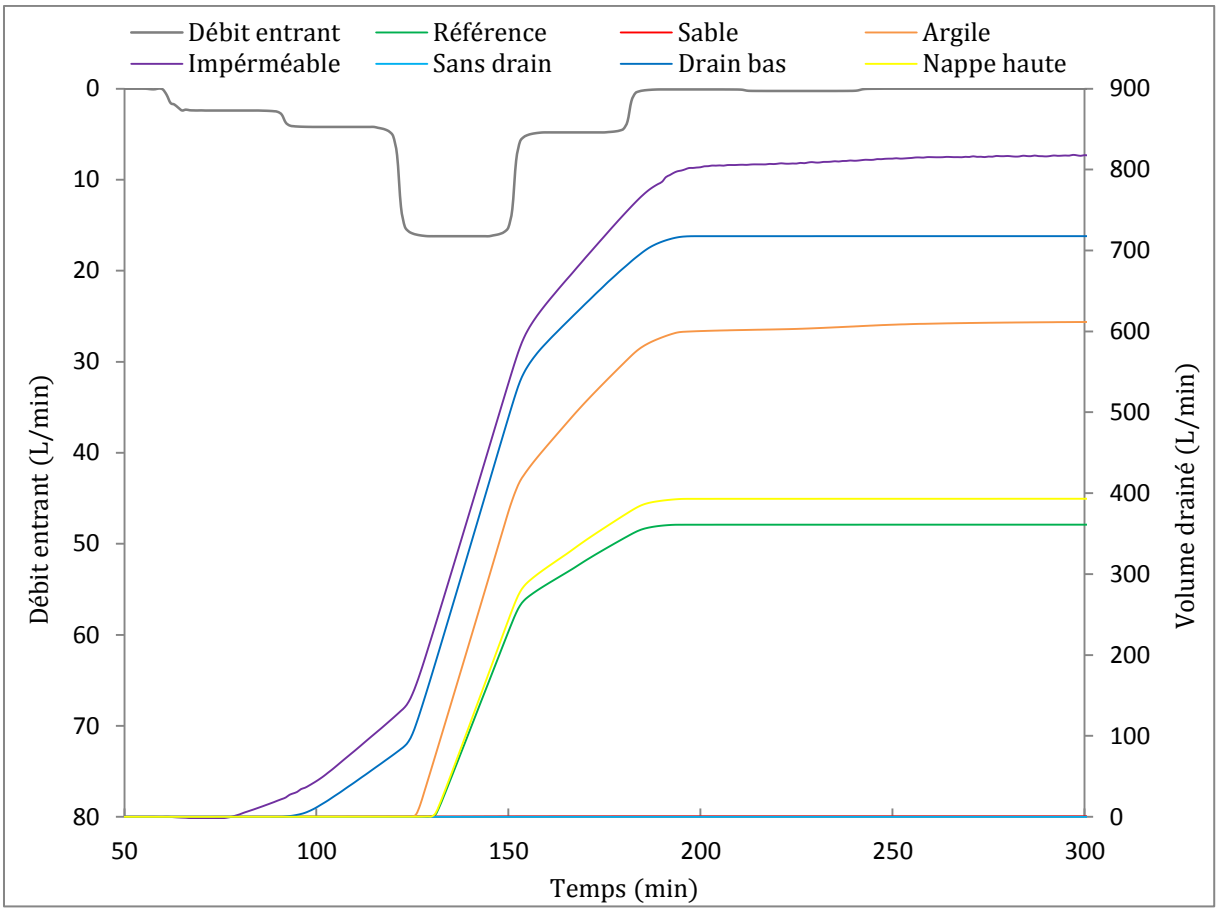


Figure 3.47 - Évolution du volume drainé (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios (Graphique centré sur la période 50 -300 minutes).

Du point de vue de la gestion des eaux pluviales, l'enjeu est de réduire au maximum le volume drainé et de le ralentir. La Figure 3.47 montre que ces deux enjeux dépendent en grande partie de la possibilité et de la vitesse d'infiltration dans le sol, et de la position du drain. La perméabilité locale est une donnée de contexte avec laquelle il faut composer. En revanche, il est possible d'optimiser notablement les performances de la structure en adaptant la hauteur du drain.

d. Stockage

Le stockage dans la structure a déjà été en partie commenté pour expliquer les trois processus hydrologiques précédemment. En plus des constats déjà présentés, la Figure 3.48 permet d'observer trois groupes de scénarios.

- Le premier groupe est composé des scénarios « sable », « imperméable » et « drain bas » pour lequel il n'y a pas ou très peu de stockage par saturation du fond de la couche de fondation, soit en raison de la forte perméabilité du sol, soit de la position du drain. Pour ces trois essais le volume stocké varie très rapidement en fonction du débit entrant et est majoritairement composé par le volume de rétention des couches de surface.

- Le deuxième groupe est composé des scénarios « référence », « nappe haute » et « argile ». Dans ces trois cas, le drain est situé à 20 cm au-dessus du fond de la structure. Pour ces trois essais, l'accumulation de l'eau dans la structure est continue, avec une accélération lorsque le débit entrant augmente mais aucun palier intermédiaire. Lors de la vidange en revanche le volume stocké semble présenter dans les trois cas un pallier après le pic de pluie avant de chuter à nouveau. L'existence de ce palier est principalement due à l'écoulement de l'eau gravitaire stockée dans les couches de surface lors du pic de pluie. Cette eau s'écoule rapidement vers la fondation après le pic et est évacuée par drainage. Ce qui explique que le scénario avec un sol argileux présente la même courbe que les deux autres jusqu'au premier arrêt de la pluie. En revanche, une fois la pluie finie c'est l'infiltration du volume présent dans la couche de fondation qui contribue majoritairement à la diminution du volume stocké, c'est à ce moment-là que la courbe du scénario « argile » se sépare des deux autres.
- Enfin, le troisième et dernier groupe est composé du seul scénario « sans drain ». Comme déjà commenté, il n'y a pas ici de stabilisation du volume stocké qui augmente tant que le volume entrant est supérieur à l'infiltration et diminue lorsque les deux débits se croisent. C'est ce scénario qui présente le pic de stockage le plus décalé par rapport au pic de pluie avec un retard de 40 minutes contre 10 à 13 minutes pour les autres scénarios.

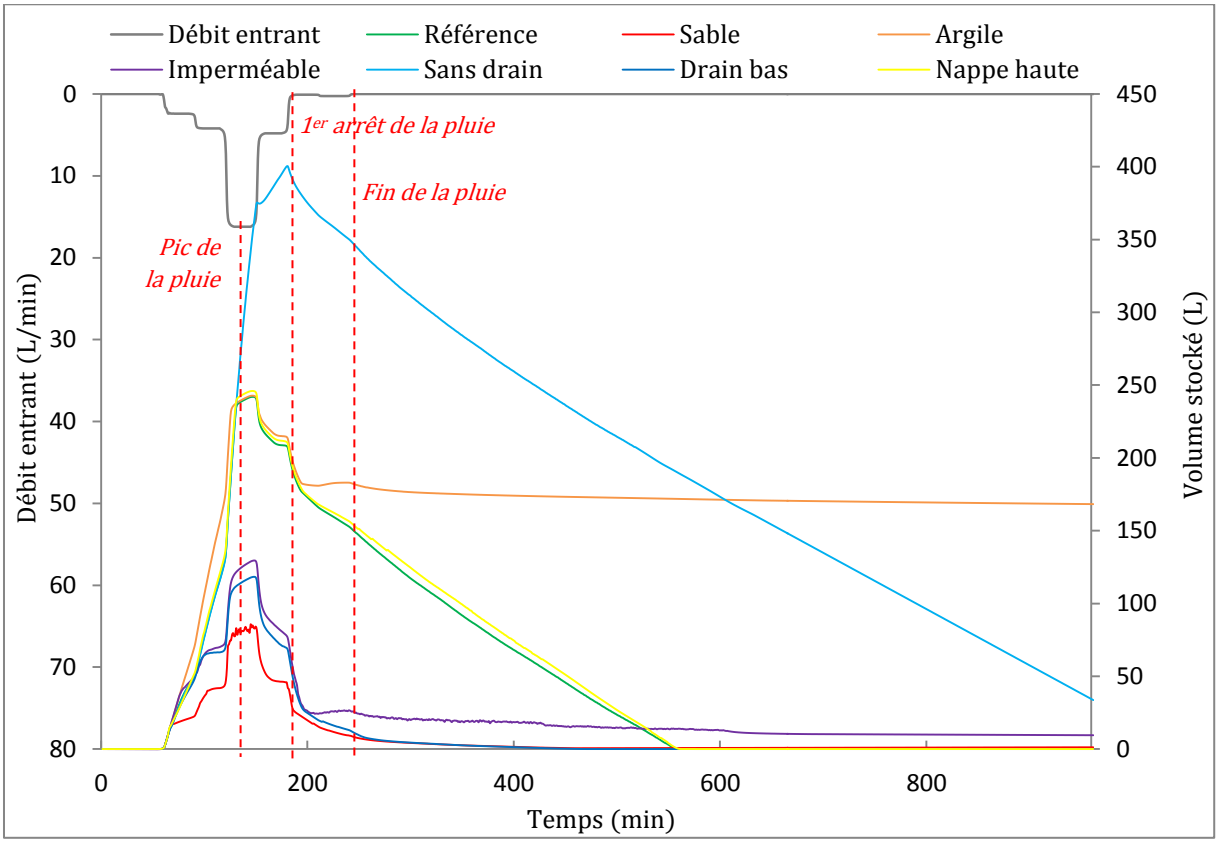


Figure 3.48 - Évolution du volume total stocké dans la structure (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios.

Au regard des objectifs de performance des revêtements perméables, il convient de favoriser les choix de conception permettant d'augmenter le stockage dans la structure (position du drain notamment) tout en veillant à ce que ce stockage soit conforme aux critères concernant le temps de vidange (ici le scénario « argile » n'est pas satisfaisant), et que le niveau d'eau maximum dans la structure soit maîtrisé (ici le scénario « sans drain » ne satisfait pas ce critère).

3.3.2.4 ANALYSE DES SCÉNARIOS PLUVIOMÉTRIQUES

Les scénarios pluviométriques sont tous basés sur le même contexte et la même structure que l'essai de référence, seule la pluviométrie change d'un scénario à l'autre. Les résultats sont présentés en deux parties : dans un premier temps les essais portant sur des événements ponctuels, dans un second temps ceux simulant des séries d'événements.

a. Comparaison des événements pluviométriques

Les sept événements pluviométriques définis au chapitre 2 sont simulés. Les résultats des essais sont présentés dans les tableaux 3.17 et 3.18. Les résultats concernant les processus hydrologiques et le stockage sont détaillés sur les figures 3.49 et 3.50 qui comparent les sept simulations.

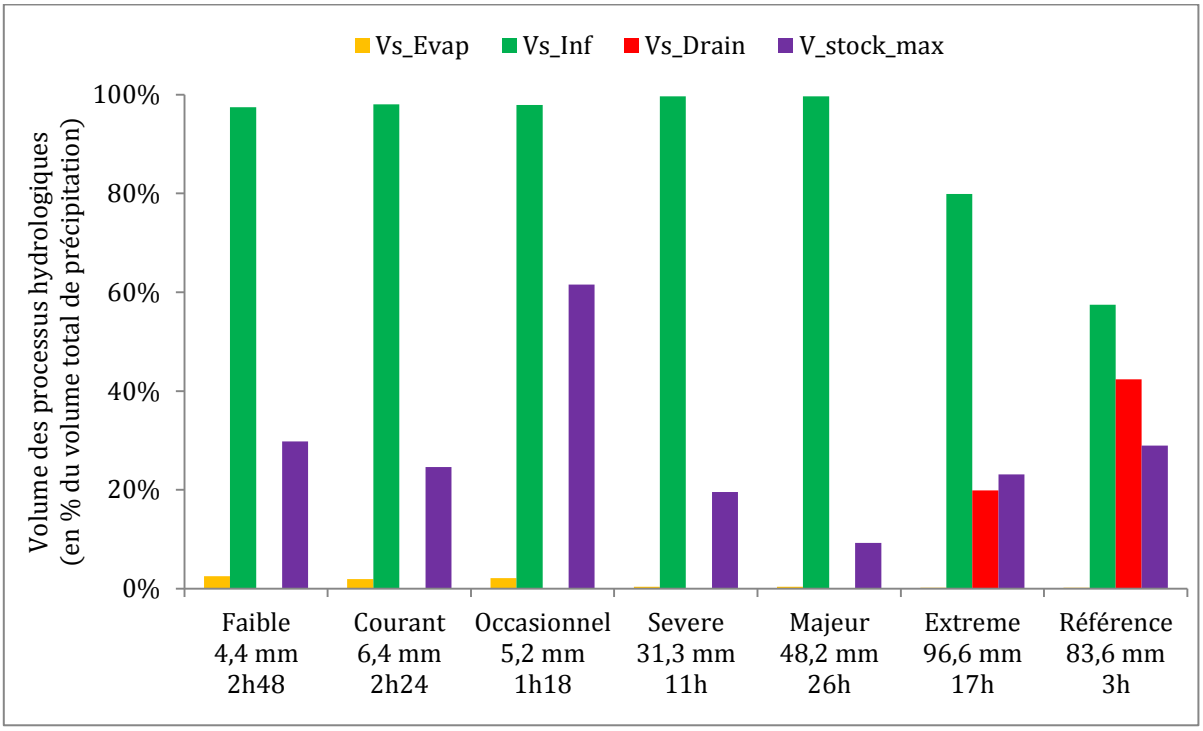


Figure 3.49 – Comparaison du volume total de chaque processus hydrologique, exprimé en % du volume entrant, pour les différentes typologies d'événements pluvieux.

La Figure 3.49 présente une évolution attendue des volumes des processus hydrologiques. L'infiltration est le processus largement majoritaire. Il diminue, pour les événements dit « extrêmes », au profit du drainage en fonction de l'intensité et du cumul des événements. Comme dans l'essai de référence, l'évaporation reste très faible pour l'ensemble des événements, avec une valeur légèrement significative pour les événements dits « faibles », « courants » et « occasionnels ».

Le ratio du volume de stockage maximum sur le volume total entrant dans la structure ne semble pas présenter une évolution corrélée au cumul de la pluie mais plus à la durée de l'événement (plus l'événement est court, plus le ratio est élevé). Ce ratio reste assez stable pour l'ensemble des scénarios (compris entre 10 et 30 %) à l'exception de l'événement l'occasionnel (61 %). La Figure 3.50 présente les volumes stockés dans la structure exprimés en litre. Le volume total stocké montre alors une évolution plus liée au cumul de pluie qu'à la durée de l'événement.

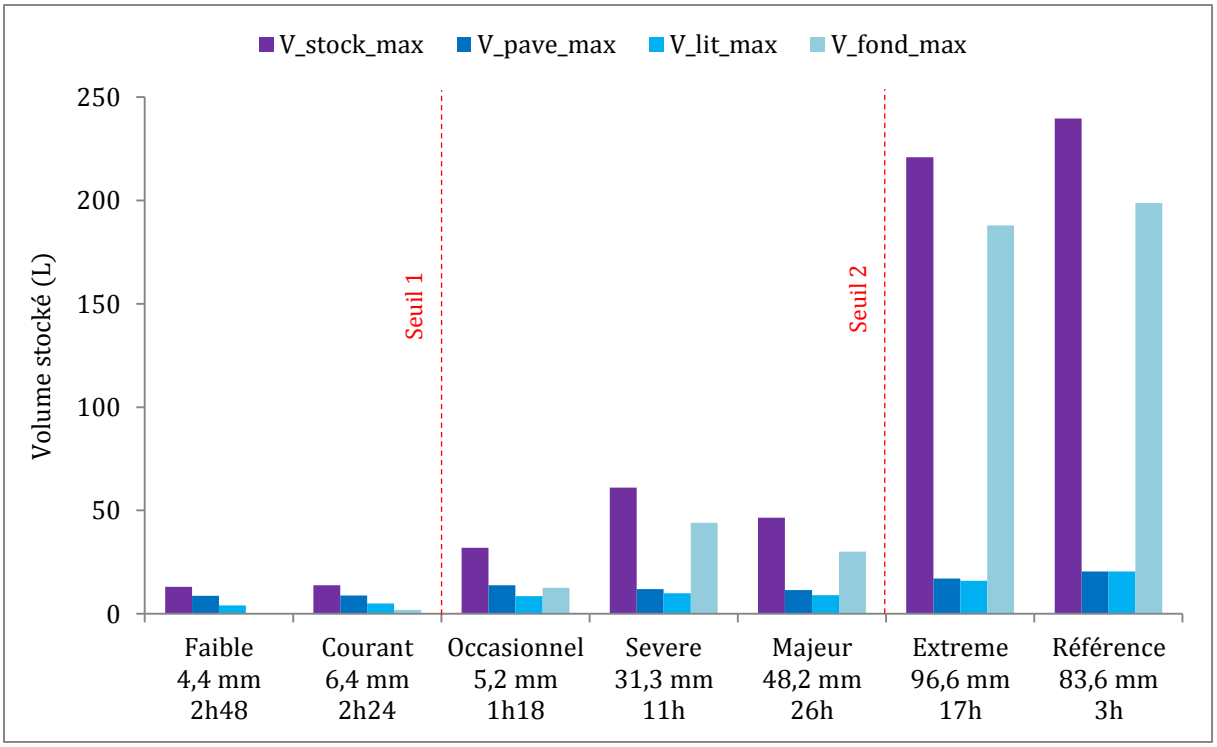


Figure 3.50 –Comparaison du volume maximum stocké dans les différentes couches de la structure pour les différentes typologies d'événements pluvieux.

La présentation des résultats en volume et non pas en pourcentage du volume entrant permet d'observer également que le volume de rétention (volume stocké dans les pavés et dans le lit de pose) évolue peu entre les scénarios. Le volume stocké dans la couche de pavé drainant est compris entre 8 à 20 litres. Le volume stocké dans le lit de pose évolue un peu plus avec l'intensité de la pluie, il est compris entre 4 et 20 litres. Ces résultats mettent en évidence deux seuils :

- un premier seuil qui sépare les scénarios « courant » et « occasionnel » avec le début du stockage au fond de la couche de fondation. En deçà de ce seuil, le stockage a presque exclusivement lieu dans les deux premières couches, et il s'agit d'un stockage dit de rétention. Dans ces simulations, le débit d'eau entrant reste inférieur (événement faible) ou légèrement supérieur (événement courant) à celui du débit d'infiltration vers le sol, entraînant une mise en charge du fond de la structure faible voire nulle ;
- un second seuil qui sépare les événements « majeur » et « extrême » qui marque le début de la saturation de la couche de fondation et donc du drainage. En deçà de ce seuil, l'eau est stockée dans la couche de fondation sans atteindre le niveau du drain. Au-dessus, le stockage maximum dans la fondation est atteint, le surplus est évacué par le drain.

Les deux scénarios extrêmes présentent des volumes de stockage maximum similaires mais une dynamique différente. Pour le scénario de référence, le débit entrant très fort entraîne une montée rapide du niveau d'eau jusqu'à atteindre un régime permanent où le débit drainé est égal au débit entrant. Pour l'événement extrême (96,6 mm de pluie en 17h) le volume total cumulé est plus important mais avec un débit moins fort, la montée de l'eau dans la structure est beaucoup plus lente. Dans les deux cas, l'évacuation par le drain intervient lors du pic de la pluie.

b. *Comparaison des séries d'événements*

Seules trois séries d'événements pluvieux (« courante », « occasionnelle » et « majeure ») ont été simulés sur les cinq décrites au chapitre 2. En effet, compte tenu de la durée des séries (de 4 à 15 jours) et du pas de temps nécessaire à la simulation (autour de 5 secondes), la durée de modélisation a limité le nombre de simulations réalisables. Les résultats des trois séries modélisées sont donnés dans les tableaux 3.17 et 3.18. Leurs bilans hydrologiques sont comparés sur la Figure 3.51.

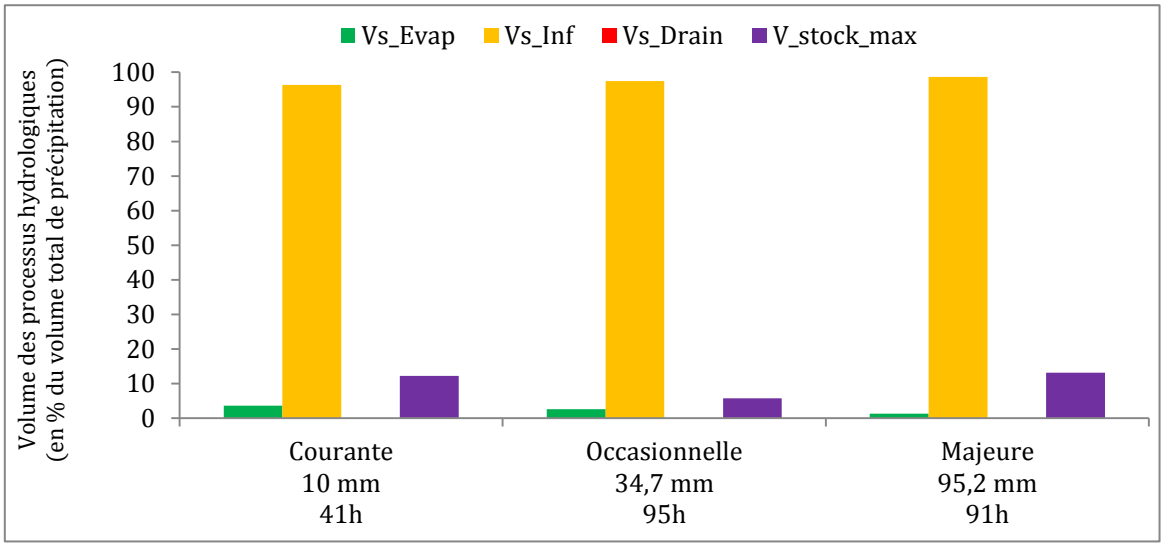


Figure 3.51 – Comparaison du volume total de chaque processus hydrologique, exprimé en % du volume entrant, pour les différentes typologies de séries d'événements pluvieux.

La Figure 3.51 montre que la quasi-totalité de l'eau entrée dans les structures perméables est évacuée par infiltration, quelle que soit la série étudiée. Ces résultats s'explique par l'absence de drainage, due au fait que le niveau d'eau dans la structure n'atteint jamais la hauteur du drain, et par un volume d'évaporation faible (probablement un peu sous-estimé par le modèle ici).

L'observation de la dynamique des écoulements dans la structure au cours de ces séries d'événements permet de préciser ces résultats. Les séries d'événements étant composées d'une succession de pluies peu ou moyennement intenses, la structure stocke l'eau majoritairement dans les deux couches de surface (pavés et gravillons), comme le montre la Figure 3.52.

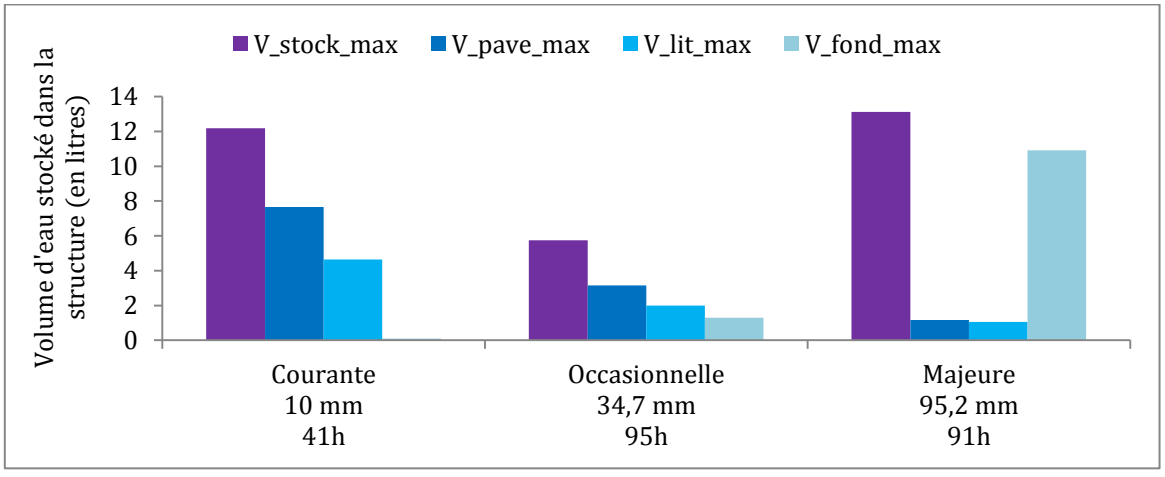


Figure 3.52 – Comparaison des volumes d'eau stockés dans la structure en fonction de la série d'événement pluvieux.

Dans le cas de la série « majeure », l'intensité plus importante de certains des épisodes pluvieux entraine le stockage de l'eau dans la couche de fondation, mais sans que le niveau d'eau atteigne la hauteur du drain.

Ce volume d'eau est ensuite évacué par infiltration et évaporation pendant et après la pluie. Compte tenu des faibles volumes en jeu, l'eau présente dans la structure est vidangée dans la majorité des cas avant la pluie suivante, ce qui évite la mise en charge de la structure. Les figures 3.53 et 3.54 illustrent cette dynamique dans le cas de la série « courante » en montrant l'évolution de la teneur et des débits cumulés des différents processus hydrologiques.

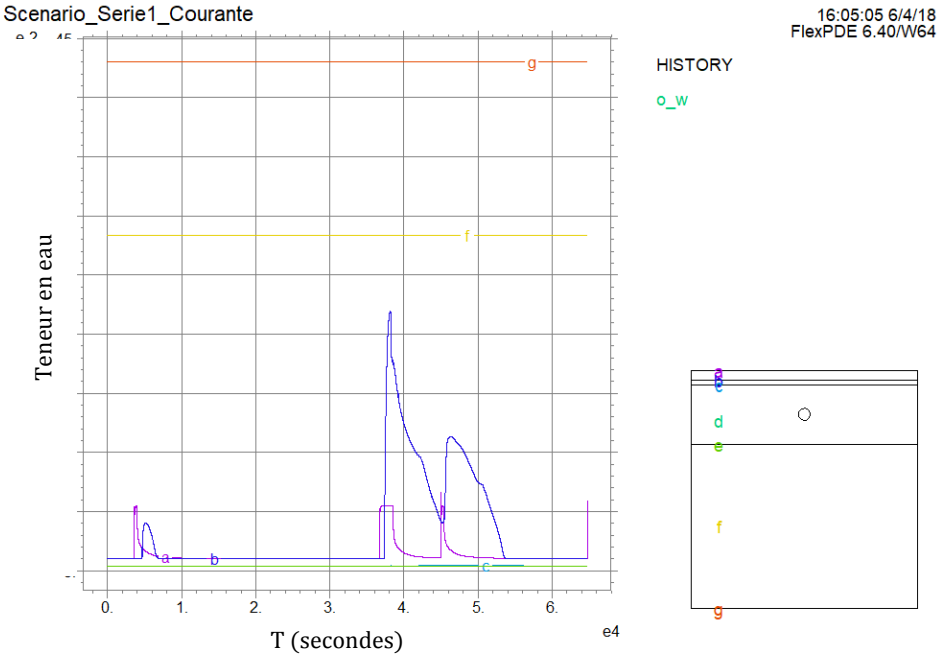


Figure 3.53 – Sortie du modèle *PermetAble*. Teneur en eau à l'instant $t = 64832$ secondes, à différentes profondeurs dans la structure le long de la coupe situé à gauche de la structure. Série « courante ».

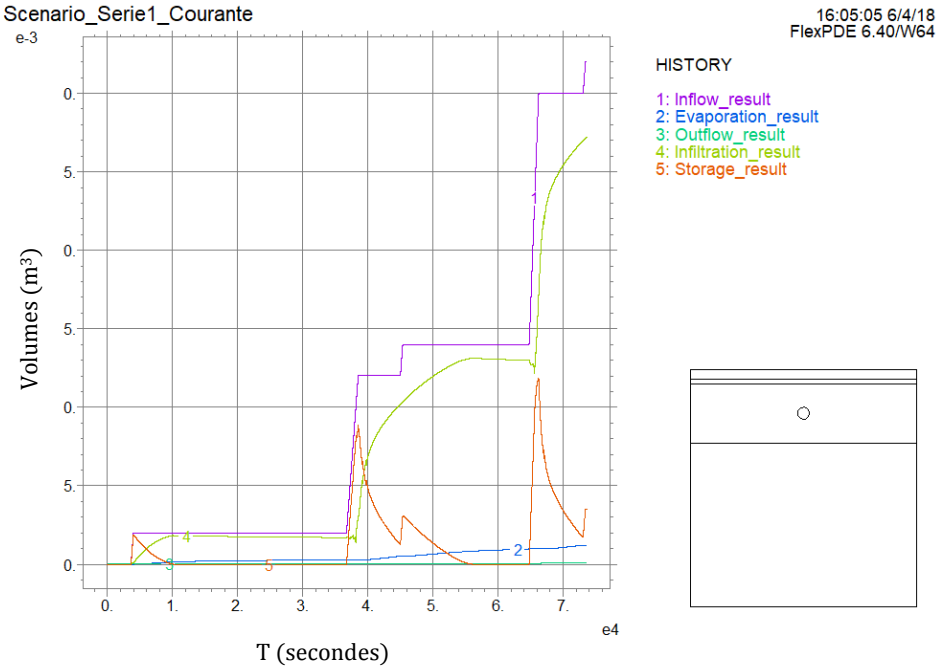


Figure 3.54 - Sortie du modèle *PermetAble*. Débit cumulés tracés en fonction du temps de $t = 0$ à $t = 73730$ secondes. Série « courante ».

3.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3 ET DISCUSSION

Ce chapitre a montré la possibilité de construire une modélisation physique des processus hydrologiques au sein des structures perméables en se basant presque exclusivement sur des paramètres mesurables physiquement. Cette approche permet de limiter le travail de calage du modèle. Surtout, l'usage de paramètres qui ont un sens physique facilite l'exploration du modèle et l'analyse de l'influence de chaque paramètre sur les résultats.

Le modèle *PermetAble* permet de répondre aux objectifs de ce travail en apportant des éléments de quantification et surtout de compréhension sur les processus hydrologiques qui ont lieu dans les structures perméables. La modélisation développée permet d'observer les écoulements au cœur de la structure et d'entrer en finesse dans la compréhension de la dynamique des processus. Il semble ainsi bien adapté pour apporter des éléments de compréhension « fondamentale » des écoulements et de leur modélisation. La finesse de la modélisation est également intéressante pour étudier l'optimisation de la conception de la structure et l'influence de chaque paramètre. En revanche, cette modélisation physique très fine semble peu optimisée en termes de données nécessaires et de temps de calcul, pour le seul objectif de quantification des processus hydrologiques au sein des structures perméables. Une approche plus conceptuelle pourrait apporter des résultats équivalents avec un besoin de données et de temps de calcul bien moindre.

3.4.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS PRINCIPAUX

L'analyse de sensibilité réalisée a permis de mettre en évidence les différentes influences des paramètres. La majorité correspond à des résultats attendus et logiques. Certaines relations observées sont plus intéressantes et moins anticipées (comme l'influence de la perméabilité de la couche de fondation et l'attention à avoir sur la position horizontale du drain). Une bonne exploitation de ces influences pourrait permettre d'optimiser la conception des structures perméables dans l'objectif de maximiser l'infiltration et minimiser le volume évacué par le drain.

Les résultats des essais réalisés permettent de décomposer les processus au sein des structures perméables. Sur la base des observations et des analyses présentées, une modélisation simplifiée des structures perméables a été construite. Cette modélisation est développée ici en présentant au fur et à mesure les principaux résultats quantitatifs obtenus sur les performances des structures à revêtements perméables.

3.4.1.1 MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Les enseignements de l'exploitation du modèle *PermetAble* peuvent être synthétisés en décomposant les processus hydrologiques au sein des structures perméables en deux réservoirs, détaillés sur la Figure 3.55 :

- un réservoir de rétention composé de la couche de béton perméable et du lit de pose. Ce réservoir est alimenté par une 'fonction d'entrée' dans la structure qui dépend du ruissellement entrant et de la perméabilité de surface. Il est drainé principalement par une fonction de transfert vers la couche de fondation et l'évaporation de surface ;

- un réservoir de stockage à saturation dans la partie basse de la fondation. Ce réservoir est alimenté par la 'fonction de transfert'. L'eau s'évacue par infiltration dans le sol (si infiltration possible) et par le drain qui agit comme une surverse de sécurité.

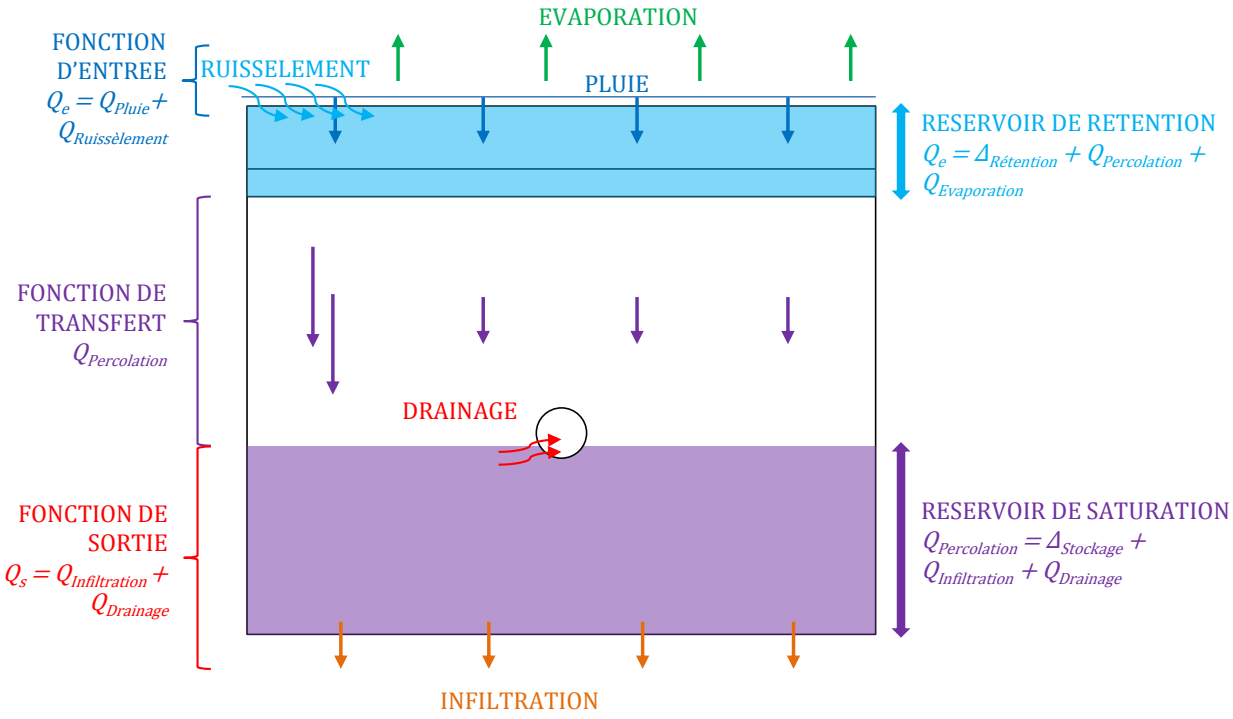


Figure 3.55 - Schéma de modélisation conceptuelle des revêtements perméables, construit sur la base des résultats du modèle *PermetAble*.

Cette décomposition est un des résultats majeurs de ce travail. Elle est utilisée à l'étape suivante pour modéliser de façon conceptuelle les revêtements perméables à l'échelle d'un bassin versant. Elle permet une simplification de la modélisation de ces structures et apporte de nouveaux éléments de compréhension des processus au sein de la structure. Les différents ensembles de cette décomposition sont détaillés dans les points suivants en explicitant pour chacun les paramètres qui l'influencent le plus.

a. Fonction d'entrée

La fonction d'entrée traduit la capacité de la couche de surface à absorber le volume entrant. Compte tenu de la valeur de perméabilité du béton drainant, ce type de matériau, même colmaté, a une perméabilité suffisante pour absorber le flux de pluie directe. Tout l'enjeu de la fonction d'entrée réside donc dans la capacité de la couche de surface à absorber le ruissellement.

Les résultats de l'analyse de sensibilité ont montré que les deux paramètres les plus influents sont le ratio surface contributrice imperméable sur surface perméable et le niveau de colmatage de la structure (auxquels il faut ajouter l'intensité et la durée de la pluie). Certains essais (avec un colmatage à 50 % ou 90 %) ont en effet nécessité d'augmenter la longueur de diffusion du ruissellement pour éviter une saturation en surface. Cela traduit l'observation faite sur le terrain du même phénomène (Annexe B) : en cas d'augmentation du volume ruisselé ou du colmatage,

le ruissellement s'étale plus en surface. Cet étalement permet d'une part d'augmenter la surface d'entrée dans la structure et d'autre part d'atteindre une zone moins colmatée[19].

Par ailleurs, les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que la longueur de diffusion du ruissellement a peu d'incidence sur les performances de la structure, sauf dans le cas d'une conception avec une forte asymétrie (drain sur une extrémité).

En synthèse, la fonction d'entrée en surface peut être représentée par la comparaison du débit d'entrée (ruissellement et pluie directe) à une valeur de perméabilité moyenne, qui inclut les zones colmatées et moins colmatées, multipliée par la surface de la structure. Tant que le débit entrant reste inférieur à la perméabilité de surface, la structure absorbe l'ensemble du ruissellement et de la pluie directe. La variation de la longueur de diffusion influence peu les performances de la structure, donc une structure même colmatée assure les mêmes bénéfices tant que sa surface est capable d'absorber le volume entrant.

b. Réservoir de rétention

L'un des principaux enseignements de l'exploration du modèle *PermetAble* est l'identification du stockage par rétention dans les couches de surface (béton drainant et lit de pose). En raison de leurs plus faibles tailles de pores, ces matériaux présentent une capacité de rétention d'eau renforcée par un effet d'interface entre la couche de béton drainant et celle du lit de pose d'une part, et surtout entre le lit de pose et la couche de fondation d'autre part.

Ce phénomène de rétention conduit à la mise en place d'un front d'infiltration au début des événements pluvieux. La mise en place de ce front retarde l'arrivée de l'eau dans la couche de fondation (de 8 minutes dans le scénario de référence), voire entraîne une rétention de tout le volume entrant dans les couches de surface (lors de faibles événements).

Les différents essais, notamment les scénarios pluviométriques, ont permis d'observer que le volume stocké par rétention dépend du débit entrant. Le volume stocké est d'autant plus faible que le volume entrant est faible (Tableau 3.19). Par ailleurs ce volume évolue au cours de la pluie, toujours en fonction du débit entrant. Ce constat permet de souligner qu'il ne s'agit pas d'un volume d'eau statique, lié aux matériaux, mais d'un volume d'eau dynamique. En plus du phénomène de capillarité, cette rétention s'explique par le ralentissement de l'écoulement de l'eau dans les couches de surface. Ainsi, la majorité du volume stocké par rétention reste libre de s'écouler par gravité. Dès que le débit entrant diminue, l'écoulement de l'eau par gravité vers la couche de fondation devient supérieur à ce débit entrant et le réservoir dit de rétention se vide progressivement.

Tableau 3.19 – Volume de rétention dans les couches de surfaces en fonction du débit entrant (Scénario de référence).

Débit entrant	Rétention pavé	Rétention lit	Rétention totale
L/min	*L*	*L*	*L*
2,4	9	8,6	17,6
4,2	13	13	26
16,2	21	21	42

[19] Ces observations sont favorables pour la durabilité des structures à revêtements perméables. En effet ces dernières vont se colmater progressivement en partant de l'entrée du ruissellement le plus important. La progression du colmatage visible en surface permet de suivre la capacité de la structure à absorber l'eau entrant et ainsi d'optimiser les opérations de maintenance.

Les couches de surface jouent ainsi un rôle de temporisation des écoulements. En stockant une partie de l'eau entrant, elles retardent l'écoulement vers la fondation au début de la pluie. Ce volume est principalement évacué par gravité (par la fonction dite de transfert) ce qui conduit à prolonger les écoulements vers la fondation même après la fin de la pluie, favorisant ainsi l'infiltration et diminuant un éventuel volume drainé. Enfin, une petite partie du volume stocké par rétention est évacué par évaporation, la quantité évaporée étant d'autant plus importante que le volume stocké en surface est important.

Ce processus participe ainsi pleinement aux bénéfices des structures perméables. Il contribue à ralentir les écoulements et à favoriser l'infiltration et l'évaporation. Pour optimiser la conception des structures perméables, il est donc souhaitable de favoriser la rétention en surface. Comme l'ont montré les résultats de l'analyse de sensibilité portant sur le calage des paramètres de description des matériaux, ce stockage par rétention est particulièrement influencé par les propriétés des matériaux (courbe de rétention d'eau décrite par la loi de VAN GENUCHTEN). La perméabilité des matériaux influence également la rétention. Les essais portant sur le colmatage des couches de surface ont montré qu'une diminution de la perméabilité augmente légèrement le volume maximum stocké dans les couches de surface. De futures recherches pourront utiliser ces observations pour optimiser la porosité et la perméabilité des matériaux utilisés.

c. Évaporation

Le modèle *PermetAble* ne permet pas réellement d'explorer l'évaporation qui intervient dans les structures perméables. Les observations avancées ici nécessiteraient de futures recherches pour être approfondies.

Au regard des résultats obtenus, il semble que le processus de remontée capillaire de l'eau n'intervienne que dans les deux couches de surface. Une fois dans la couche de fondation, l'eau est drainée vers le sol ou le drain et ne parvient pas à remonter vers la surface pour être évaporée. En conséquence, le volume disponible pour l'évaporation dépend seulement de la quantité d'eau retenue par rétention dans les couches de surface. Les essais de vérification, réalisés sans flux d'évaporation en condition limite et l'exploration des différents scénarios permettent d'estimer entre 1 et 2 litres la quantité d'eau retenue dans les deux couches de surface qui ne peut pas s'écouler par gravité vers la fondation (pour 1 m^2 de structure, soit une lame d'eau de 1 à 2 mm). Ce constat permet de confirmer la valeur de 2 mm avancée comme lame d'eau minimum pour qu'un événement pluvieux provoque un écoulement vers la fondation de la structure. Tous les événements inférieurs sont ainsi absorbés par les premiers centimètres de la structure et évaporés.

d. Fonction de transfert

La fonction de transfert désigne l'écoulement de l'eau dans la couche de fondation, depuis le lit de pose vers le fond de la structure. Compte tenu de la perméabilité et de la taille des pores de la couche de fondation, l'écoulement se produit rapidement et sans qu'un front d'infiltration soit réellement visible. Cependant, l'analyse de sensibilité, notamment le point détaillé sur le rôle de la perméabilité de la fondation, et le calage de la structure avec l'étude de la perméabilité minimum, ont montré que la valeur de perméabilité de la fondation influence significativement l'écoulement et la rétention dans cette couche.

Ces observations soulignent là encore le potentiel d'optimisation des matériaux qui composent la couche de fondation. En effet, en diminuant la perméabilité, il est possible d'augmenter le stockage et de favoriser l'infiltration.

e. Réservoir de saturation

Une fois que l'eau atteint le fond de la structure, un processus de stockage par saturation des pores peut se mettre en place. Ce stockage intervient selon une équation réservoir classique avec en entrée le flux d'eau qui s'écoule depuis le lit de pose et en sortie le flux d'eau infiltré dans le sol. Comme les essais expérimentaux de vérification le montrent, ce flux infiltré augmente à mesure que le niveau d'eau monte dans la structure. Si le niveau d'eau atteint le drain, il agit alors comme une surverse et l'eau excédentaire est évacuée *via* le drain.

Ce stockage au fond de la structure dépend majoritairement du type de sol et de la position du drain (sa position verticale principalement et la position horizontale dans une moindre mesure). Il est également influencé par la perméabilité de la couche de fondation comme cela a été rappelé dans la description de la fonction de transfert.

Le dimensionnement de ce réservoir constitue l'un des principaux enjeux de la conception des structures perméables. Au regard des résultats obtenus, les choix suivants permettent de favoriser l'infiltration et donc de diminuer un éventuel drainage :

- placer le drain à l'opposé de l'entrée du ruissellement le plus important ;
- placer le drain le plus haut possible, en retenant soit le critère de stabilité (empêcher que l'eau ne monte trop haut dans la structure), soit le critère de temps de vidange (calculer la hauteur maximum du drain en fonction de la perméabilité du sol de façon à ce que le volume stocké puisse être évacué dans une durée choisie).

f. Fonction de sortie

Il s'agit ici de l'infiltration dans le sol (quand elle est possible) et du drainage. Ces deux processus représentent la majorité de l'évacuation de l'eau pour les scénarios climatiques testés. L'infiltration, et par conséquent le drainage, dépendent des mêmes paramètres que ceux développés pour le réservoir de saturation. La répartition entre les deux processus dépend ainsi principalement de la perméabilité du sol, de la hauteur du drain et du débit entrant d'eau entrant dans la structure.

3.4.1.2 QUANTIFICATION GLOBALE DES PERFORMANCES DES STRUCTURES PERMÉABLES

Il est difficile de donner une quantification des performances tant les résultats obtenus sont liés aux choix des paramètres. Chaque contexte est différent et aucune généralisation de performances obtenues pour un site donné ne peut être prise comme une référence pour l'appliquer ailleurs. Cependant quelques enseignements généraux peuvent être tirés de l'étude réalisée.

a. Bilan annuel

Les performances ne peuvent être dissociées des conditions de pluviométrie. Pour donner une quantification globale des performances de revêtements perméables, il semble plus juste de ne pas considérer les événements indépendants, mais de donner un bilan annuel potentiel.

En repartant de la classification pluviométrique présentée dans la section 2.4 et des résultats obtenus avec l'exploration du modèle *PermetAble* (dans les conditions du scénario de référence), une quantification des processus hydrologiques des revêtements perméables est proposée (Tableau 3.20).

Ce tableau est basé sur les résultats moyens constatés et n'a pas pour objet de donner des valeurs exactes mais plus un ordre de grandeur. À partir de ces valeurs, il est possible de donner une estimation de l'ordre de grandeur de la répartition des processus hydrologiques sur le cumul annuel de modélisation. Ces estimations reposent sur l'hypothèse que tout le volume d'eau entrant est absorbé par la surface perméable, d'où l'absence de ruissellement.

Tableau 3.20 – Répartition des processus hydrologiques en fonction de la typologie de pluie. % des jours et % de pluie obtenus à partir des données de pluviométrie journalières de Météo-France (station Caen-Carpiquet) pour la période 1945-2017.

Catégorie	Jours/an	Pluie/an	Évaporation	Infiltration	Drainage
	%	*%*	*% Volume entrant*	*% Volume entrant*	*% Volume entrant*
Extrême	0,01	0,51	0	70	35
Majeur	0,04	1,11	0	100	0
Sévère	0,38	6,16	0	100	0
Occasionnel	1,58	15,12	2	98	0
Courant	2,94	18,23	2	98	0
Faible	8,16	28,98	2,5	97,5	0
< 2 mm	37,94	29,90	100	0	0

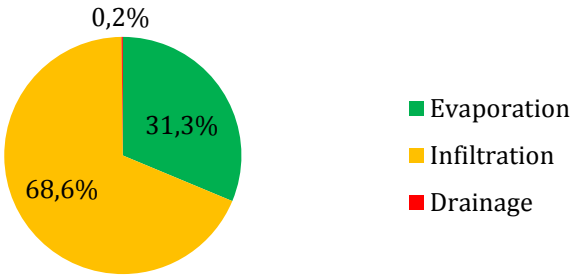


Figure 3.56 - Répartition des processus hydrologiques des structures perméables en % de la pluviométrie annuelle.

La Figure 3.56 met en évidence la très faible proportion de l'eau drainée vers les réseaux. Elle confirme tout l'intérêt, déjà bien connu, des surfaces perméables. Leur rôle est de déconnecter le maximum de surface en éliminant le ruissellement de surface d'une part, et en évitant l'évacuation par réseaux d'autre part.

b. Évaporation

Concernant l'évaporation, les résultats rappelés dans le Tableau 3.20 montrent qu'à partir du moment où un événement pluvieux est significatif, au-dessus de l'ordre d'environ 2 mm, la majorité de l'eau infiltrée dans la structure percole jusqu'au fond de la structure et n'est donc pas disponible pour l'évaporation. Les revêtements perméables ne semblent ainsi pas apporter d'amélioration majeure de l'évaporation. Dans les conditions les plus favorables, avec les événements les plus faibles modélisés (événements faible, courant et occasionnel et séries courante et occasionnelle), l'évaporation représente entre 2,5 et 2 % du volume total entré.

En revanche, il faut préciser que les événements modélisés ne représentent que 70 % de la pluviométrie annuelle en Normandie. Pour l'ensemble des pluies qui n'entraînent pas d'écoulement vers la fondation (< 2 mm) l'évaporation est bien le processus dominant voire le seul processus d'évacuation de l'eau. La prise en compte de ces événements permet d'obtenir une estimation de l'évaporation à environ 30 % du bilan hydrologique annuel. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'une étude conduite en considérant la pluviométrie sur une période de 38 mois par une équipe du CEREMA (Berthier et al., 2006; Ramier et al., 2011). D'après ces travaux, l'évaporation sur une surface imperméable en bitume représente entre 30 et 40 % du bilan hydrologique annuel. Ces différents résultats confirment l'importance de l'évaporation, même pour des surfaces imperméables.

En conclusion sur l'évaporation, la modélisation proposée ne confirme pas le potentiel supposé des surfaces perméables pour contribuer à accroître de façon significative l'évaporation. Le pourcentage du bilan hydrologique annuel évaporé est estimé à 30 % avec une structure perméable (non végétalisée), soit proche des résultats obtenus pour des surfaces bitumées. La modélisation de l'évaporation dans le modèle est très dépendante des choix de modélisation mathématique. Aussi, ces résultats seront à confirmer ou invalider par des recherches complémentaires et notamment des expérimentations *in situ*.

c. Infiltration

Concernant le devenir de l'eau qui percole dans la structure, l'exploration du modèle permet de souligner tout le potentiel de l'infiltration, même avec des conditions non optimales. Les résultats obtenus montrent par exemple qu'avec un sol de perméabilité saturé de $5 \cdot 10^{-6}$ m/s et un ratio de surface imperméable sur surface perméable de 5, il faut atteindre des conditions de pluviométrie dites « extrêmes » pour qu'un drainage ait lieu.

L'analyse des résultats permet également de souligner que ce n'est pas le débit entrant qu'il faut considérer pour étudier l'infiltration mais le débit d'écoulement dans la fondation. Le critère dimensionnant pour évaluer la capacité de la structure à stocker et infiltrer l'eau est donc l'équilibre entre le débit de la fonction de transfert et le débit d'infiltration dans le sol. Ce qui se traduit mathématiquement par l'équation réservoir de la couche de fondation.

Équation 3.14 – Réservoir de stockage

$$Q_{Percolation} = \Delta_{Stockage} + Q_{Infiltration} + Q_{Drainage}$$

Cette observation valorise le rôle temporisateur des couches de surface. Ainsi, même un sol peu perméable permettra d'évacuer entièrement le volume d'eau entrant suite à des événements de type « faible », « courant » voir « occasionnel » pour lesquels une partie importante de l'eau est retenue par rétention et le volume restant ne permet pas à l'eau d'atteindre la hauteur d'un drain surélevé de quelques centimètres[20]. En raison de cette dynamique, l'influence de la perméabilité du sol sur le bilan hydrologique annuel est principalement limitée aux précipitations les plus importantes.

En conclusion, au regard du bilan hydrologique annuel, la perméabilité du sol n'apparaît pas tant comme un facteur limitant l'usage des structures perméables, mais plus comme un paramètre

[20] Les volumes à stocker sont compris entre 15 et 20 litres par mètre carré ; soit une lame d'eau à stocker de 15 à 20 mm. Avec une porosité de 40 % il suffit de placer le drain à 5 cm au-dessus du fond de la structure pour éviter une évacuation par le drain.

qui influence la capacité de drainage (vers le réseau, vers une zone de stockage, etc.) à dimensionner en vue des événements pluviométriques intenses.

3.4.2 DISCUSSION SUR LES LIMITES DU MODÈLE *PERMETABLE*

L'étape de vérification du modèle présente une corrélation relativement bonne entre les résultats des essais réalisés en laboratoires et ceux de la modélisation. Cependant, ce modèle présente plusieurs limites qui méritent d'être discutées.

3.4.2.1 VALIDITÉ DES HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

a. Validité du modèle de la modélisation avec l'équation de RICHARDS.

Il convient ici de rappeler que les lois d'écoulement en milieux poreux sont décrites en exprimant l'évolution du gradient hydraulique dans le milieu, $\vec{\imath}$, en fonction de la vitesse d'écoulement (vitesse de filtration), $\vec{q}$. Le gradient hydraulique entre deux points A et B étant défini comme le rapport entre la perte de charge hydraulique (Δh) et la distance (L) entres les points A et B.

Selon que l'écoulement étudié est permanent (à vitesse constante) ou transitoire (avec une variation de la vitesse au cours du temps) et selon que le régime d'écoulement est linéaire ou non linéaire la relation $\overrightarrow{q} = f(\vec{\imath})$ prend différentes expressions (Wahyudi, 1998) :

- la loi de DARCY revient à exprimer cette relation de façon linéaire (Équation 3.15), elle est valable pour des écoulements permanents et linéaires.

Équation 3.15 – Loi de DARCY

$$\vec{q} = K \cdot \vec{\imath} \qquad ou \quad \vec{\imath} = a \cdot \vec{q}$$

Avec K, le coefficient de perméabilité de DARCY (en m/s) et $a = 1/K$;

- quand le régime d'écoulement n'est plus linéaire, les forces d'inertie doivent être considérées. C'est alors la loi de FORCHHEIMER qui est utilisée dans la littérature (Smith, 1991; Van Gent, M.R.A., 1993), dans sa forme adaptée aux écoulements permanents (Équation 3.16) ou transitoires (Équation 3.17).

Équation 3.16 – Loi de FORCHHEIMER en régime permanent

$$\vec{\imath} = a \cdot \vec{q} + b \cdot \vec{q}^{\,2}$$

Équation 3.17 – Loi de FORCHHEIMER en régime transitoire

$$\vec{\imath} = a \cdot \vec{q} + b \cdot \vec{q}^{\,2} + c \cdot \frac{d\vec{q}}{dt}$$

La formule de RICHARDS, utilisée dans le cadre de ce travail, est basée sur la loi de DARCY, elle représente donc la relation entre $\vec{q}$ et $\vec{\imath}$ de façon linéaire (Équation 3.15) mais cette fois ci avec K qui varie en fonction de la teneur en eau dans le milieu (Annexe A). La prise en compte de la teneur en eau permet de généraliser la loi de DARCY aux milieux non saturés et de traduire en partie le caractère transitoire de l'écoulement. Cependant, cette formulation ne prend pas en compte les pertes de charges dues à l'apparition des forces d'inertie qui se cumulent aux forces visqueuses quand les vitesses d'écoulement deviennent élevées. Cette formulation est donc adaptée aux régimes linéaires seulement.

Dans la littérature, la classification entre les régimes d'écoulement en fonction de la vitesse d'écoulement et de la taille des pores est basée sur le nombre de REYNOLDS en milieu poreux dont l'expression dépend de la taille des pores et de la vitesse d'écoulement (Équation 3.11).

Comme cela a été développé précédemment (3.1.3.2), les écoulements en milieux poreux dans des graviers sont considérés linéaires tant que $Re < 1$. Or, comme cela a été souligné à plusieurs reprises, les vitesses de filtration modélisées dans la structure sont presque systématiquement au-dessus (voir largement au-dessus) du critère établi pour être dans des conditions d'écoulement linéaire et laminaire ($\vec{q}_{max} < 1 \cdot 10^{-4}$ m/s, Tableau 3.4). Dans ces conditions, il n'est plus valable de négliger les pertes de charge dues aux forces d'inertie. Les conditions d'utilisation de l'équation de RICHARDS ne sont donc pas réunies.

Les vitesses importantes constatées dans ce travail s'expliquent principalement en raison de la perméabilité saturée élevée des matériaux qui composent les structures perméables. Cette observation questionne la pertinence de l'utilisation de l'équation de RICHARDS pour la modélisation des structures perméables, pour le modèle *PermetAble*, mais également pour l'ensemble des modélisations basées sur cette équation qui est très largement utilisée dans la littérature.

Les conséquences, sur les résultats du modèle, de l'utilisation de cette relation en dehors de son domaine de validité sont difficiles à estimer. Il faudrait la comparer avec d'autres modèles mathématiques (basés sur la loi de FORCHHEIMER) qui prennent en compte un terme de forces d'inertie dans la détermination de la vitesse d'écoulement.

En toute logique, il est probable que la prise en compte des pertes de charge dues aux forces d'inertie conduise à la modélisation d'une vitesse de filtration plus faible que celle calculée en ne considérant que le gradient de charge hydraulique. Il est également possible qu'une formulation mathématique basée sur l'Équation 3.17 permette de s'affranchir des difficultés de résolution numérique rencontrées lors des phases de transition grâce à la prise en compte de l'accélération.

La prise en compte des forces d'inertie dans la modélisation dépasse le cadre de ce travail mais constitue une perspective importante pour la modélisation des écoulements dans les structures à revêtements perméables.

b. Validité de la loi de VAN GENUCHTEN pour représenter la CRE.

L'utilisation de la loi de VAN GENUCHTEN et la détermination des coefficients pour les matériaux de la structure ont été largement détaillées au chapitre 2. Cette loi permet de décrire la relation entre la teneur en eau et la pression interstitielle pour les milieux poreux et notamment les sols. Dans le cas des graviers, la CRE présente un profil très raide avec le passage d'une teneur en eau saturée à sec en seulement 2 cm de pression de hauteur d'eau. Cette transition rapide complexifie la résolution numérique du modèle, rendant nécessaire l'utilisation de pas de temps et d'espace très fin. Il est possible également qu'en raison de leur porosité élevée, les matériaux représentés (notamment les graviers) soient à la limite du domaine de validité d'utilisation de la loi de VAN GENUCHTEN pour décrire la CRE.

3.4.2.2 LIMITES DE LA MODÉLISATION DE L'ÉVAPORATION

Les résultats obtenus avec le modèle *PermetAble* ne montrent pas d'amélioration significative de l'évaporation dans les structures perméables. Ces résultats sont à questionner en raison

d'une part, des choix de construction du modèle, et d'autre part des hypothèses de construction des différents scénarios testés.

- Concernant la représentation de l'évaporation dans le modèle, il s'agit uniquement d'un flux d'évaporation imposé en condition limite, la valeur du flux d'évaporation étant calculée à partir de l'évaporation potentielle et de la quantité d'eau disponible en surface. Cette représentation limite l'évaporation à la surface de la structure, ce qui est une représentation trop simplifiée d'un processus d'interface complexe qui intervient probablement sur plusieurs centimètres dans la structure.
- Concernant les scénarios représentés, la modélisation des précipitations dans le modèle *PermetAble* est centrée sur la durée de la pluie (plus 12 heures) ce qui est court pour considérer le potentiel réel d'évaporation *via* ces structures. La modélisation de longues chroniques de temps serait à privilégier pour donner une représentation plus fidèle de l'importance du processus d'évaporation.

Ainsi, les résultats du modèle concernant la quantification de l'évaporation ne peuvent pas être exploités en l'état. Il sont d'ailleurs en contradiction avec de précédents travaux (Brown et Borst, 2015; Göbel et al., 2013; Li et al., 2014) qui montrent, à partir de mesures de terrain, que les surfaces perméables peuvent contribuer à améliorer l'évaporation (avec un volume évacué jusqu'à 240 % plus élevé qu'avec un revêtement imperméable traditionnel (Göbel et al., 2013)). En revanche, le modèle apporte quelques éléments intéressants concernant les paramètres qui favorisent l'évaporation (3.3.2.3). Les résultats obtenus soulignent l'importance de la teneur en eau disponible dans les deux couches de surface et l'influence de la perméabilité sur la rétention d'eau. Ces observations sont confirmées par les résultats de recherches précédemment cités. Une étude expérimentale (Li et al., 2014) souligne que la quantité d'eau disponible dans la couche de surface est le facteur le plus important pour favoriser l'évaporation. D'après ces travaux, la porosité et la perméabilité sont les deux propriétés qui influencent le plus cette rétention d'eau en surface.

Pour améliorer le modèle, la représentation des processus thermo-hydrauliques est souhaitable avec le couplage des variables de pression interstitielle et de température pour établir des bilans des flux de masse d'eau sous la forme liquide et vapeur dans la structure. Le couplage des équations de RICHARDS (mouvement de l'eau liquide), FOURIER (transfert de chaleur par conduction), NEWTON (transfert de chaleur par convection), et de changement d'état dans le logiciel FlexPDE a déjà fait l'objet de travaux de recherches (Pooneh Maghoul, 2012). Le développement d'une telle modélisation pourrait permettre de contribuer au développement de matériaux optimisés pour favoriser la rétention et la remontée capillaire de l'eau dans les couches de surface et ainsi améliorer l'évaporation.

L'étude du potentiel d'amélioration de l'évaporation avec les structures perméables reste donc un enjeu de modélisation majeur. Cet aspect est d'autant plus important que l'évaporation s'accompagne d'une consommation de chaleur et peut ainsi contribuer significativement à lutter contre les effets d'îlots de chaleur en ville.

3.4.2.3 INFLUENCE DES CHOIX DE CONSTRUCTION DES ESSAIS DE RÉFÉRENCE

Pour explorer le modèle des simulations de référence ont été réalisées. Une pour l'analyse de sensibilité et une pour la comparaison des différents scénarios. Ces deux essais de référence présentent un certain nombre de propriétés en commun, sol de type limoneux, précipitation de

type « extrême » simulant l'orage du 22 juillet 2013 sur Caen, drain placé au centre de la fondation, hauteur de nappe. Surtout dans les deux cas, le ratio de surface imperméable sur la surface perméable est relativement faible, avec un ratio de 1 pour l'analyse de sensibilité et de 5 pour le scénario de référence.

Ces différents choix influencent nécessairement les résultats de la modélisation. Les différents scénarios ont fait varier certains paramètres permettant d'explorer différents contextes d'usage des structures perméables, mais ils restaient construits à partir du scénario de référence. La représentation d'un autre contexte de référence aurait influencé sensiblement les résultats obtenus et donc dans une certaine mesure l'analyse proposée dans ce travail.

Un des choix de paramètres semble notamment important à mettre en avant ; le ratio de surface imperméable par rapport à la surface perméable. En effet, en conditions réelles, les revêtements perméables peuvent être l'exutoire de surfaces contributrices bien plus importantes. L'augmentation de la surface drainée entraîne un ruissellement entrant plus important ce qui favorise une montée du niveau d'eau stockée plus rapide et donc augmente le ratio d'eau évacuée par le drain au détriment de l'infiltration, nuançant les résultats affichés dans ce chapitre.

3.4.2.4 LIMITES DE L'ÉCHELLE DE MODÉLISATION

Cette modélisation zoomée sur la structure est intéressante pour étudier en détails les processus hydrologiques. Cependant elle ne permet pas de quantifier les bénéfices potentiellement apportés par les structures perméables puisque ces derniers sont dépendants du contexte local, surface contributrice, type de revêtement de sol, pente et connectivité du bassin versant, etc.

Aussi la principale information à ressortir du travail réalisé avec le modèle *PermetAble* n'est pas dans la quantification des performances mais dans les apports en termes de compréhension des processus hydrologiques. Ces apports sont valorisés sous la forme de la modélisation conceptuelle proposée dans la synthèse de ce chapitre et qui est utilisée ensuite pour la modélisation à l'échelle du bassin versant. C'est cette seconde modélisation, développée au chapitre 4, qui permettra de quantifier les bénéfices potentiels des structures perméables en prenant en compte leur intégration dans un bassin versant donné.

CHAPITRE 4

4 MODÉLISATION MULTI-AGENTS À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

INTRODUCTION DU CHAPITRE

La modélisation à l'échelle d'un bassin versant constitue l'aboutissement de ce travail de thèse. Elle vise à répondre aux objectifs de quantification des bénéfices des revêtements perméables présentés dans l'introduction. Cette modélisation s'appuie sur les résultats de la modélisation à l'échelle de la structure, et notamment de la représentation conceptuelle des structures perméables proposée au chapitre 3.

Le modèle développé vise à représenter des phénomènes d'ensemble, à l'échelle du bassin versant (bilan hydrologique, hauteur de ruissellement) à partir de la modélisation des processus hydrologiques localisés, à l'échelle d'une structure perméable par exemple. L'approche retenue est conceptuelle et spatialisée. Elle s'appuie sur une approche de type système multi-agents qui permet, entre autre, de combiner simplement ces deux échelles.

La modélisation multi-agents, comme toute démarche de modélisation, est un cycle à plusieurs étapes. Comme présenté au chapitre 3, il s'agit à chaque fois de définir une question de modélisation, de la traduire avec différentes hypothèses en un modèle numérique, d'implémenter ce modèle, de le caler et le valider, et enfin d'explorer le modèle obtenu. Cette exploration peut conduire à redéfinir la question ou les hypothèses de départ, ce qui en fait une démarche itérative et/ou à faire ressortir des enseignements pour répondre à la question initiale. Dans le cas d'une modélisation multi-agents, ce cycle est schématisé sur la Figure 4.1. Ces différentes étapes structurent les sections de ce chapitre.

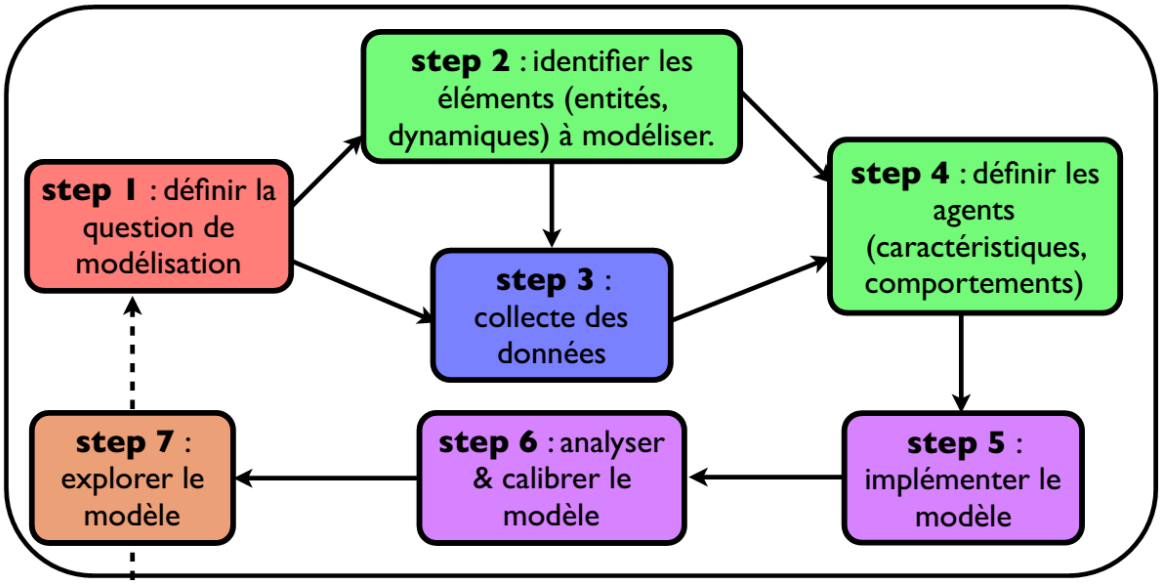


Figure 4.1 – Présentation synthétique de la démarche de modélisation multi-agents, d'après la formation du réseau MAPS (Marilleau et Gaudou, 2017)

Section 4.1 – Présentation et construction du modèle *PorousCity.* Après une présentation de la modélisation multi-agents et du logiciel Netlogo, cette section détaille les étapes 1 à 5 de la Figure 4.1 en suivant un protocole mis au point spécifiquement pour la description des modèles multi-agents, à savoir le protocole « Overview, Design concepts, and Details » (ODD) (Grimm et al., 2006). Ce choix entraine une présentation du modèle avec trois niveaux de lecture : un premier qui donne un aperçu d'ensemble non détaillé, un deuxième qui précise les concepts de modélisation utilisés et un troisième qui détaille l'implémentation du modèle.

Section 4.2 – Calage et vérification du modèle *PorousCity*. Cette section correspond à l'étape 6, de la Figure 4.1. Contrairement à l'étape de calage et de vérification conduite pour le modèle *PermetAble*, cette section ne compare pas quantitativement les résultats du modèle avec des données expérimentales ou des données de terrain, en raison notamment de l'absence de telles données, mais étudie qualitativement la cohérence des résultats du modèle. Les résultats présentés dans cette section visent à évaluer la pertinence des résultats du modèle en étudiant l'influence des choix de modélisation et des valeurs attribuées aux données d'entrée sur les résultats de sortie. Les choix et valeurs qui donnent les résultats les plus cohérents au regard des observations du ruissellement sur le terrain d'étude (Section 2.3) sont alors conservés pour l'exploration du modèle.

Section 4.3 – Exploration du modèle *PorousCity*. Cette section, correspondant à l'étape 7 de la Figure 4.1, a pour objectif d'apporter des éléments de quantification des bénéfices des structures perméables. Ce travail de quantification s'appuie sur l'exploration de différents scénarios d'aménagement (différentes implantations de revêtements perméables), comparés avec un scénario de référence correspondant à l'état actuel du bassin versant. Les résultats de ces scénarios sont complétés par une analyse de l'influence des propriétés des structures perméables et des règles de placement utilisées. Les résultats, synthétisés dans la conclusion de ce chapitre, font ressortir des ordres de grandeurs des bénéfices potentiels des structures perméables en fonction de leur dimensionnement et de leur implantation.

Section 4.4 – Synthèse du chapitre 4 et discussions. Cette dernière section revient sur les principaux résultats présentés dans le reste du chapitre pour synthétiser et compléter l'analyse de l'exploitation du modèle *PorousCity*. La pertinence de l'utilisation des systèmes multi-agents en général, et du modèle *PorousCity* en particulier, pour la modélisation en hydrologie urbaine est ensuite discutée.

SECTION 4.1

4.1 PRÉSENTATION ET CONSTRUCTION DU MODÈLE *POROUSCITY*

4.1.1 LA MODÉLISATION MULTI-AGENTS AVEC NETLOGO

Le choix d'une modélisation de type système multi-agents (SMA) a été présenté et argumenté dans le chapitre 1 (1.3.3.3). Dans la continuité, cette sous-section détaille la démarche de modélisation multi-agents et précise les atouts et les limites d'une telle approche. Le logiciel Netlogo, utilisé pour l'implémentation du code, est ensuite brièvement présenté. Un protocole spécifique est suivi dans la suite de cette section pour présenter la construction et le fonctionnement du modèle, il s'agit du protocole ODD dont les motivations et la structure sont expliquées. Enfin, la modélisation du ruissellement a fait l'objet de plusieurs travaux antérieurs qui ont guidé et inspiré ce travail. L'existence de ces travaux antérieurs a également contribué au choix de Netlogo comme outil de modélisation. Ces travaux sont succinctement présentés au chapitre 1.

4.1.1.1 LA DÉMARCHE DE LA MODÉLISATION MULTI-AGENTS

La modélisation à l'échelle du bassin versant repose sur une approche de type SMA. La modélisation multi-agents vise à permettre l'observation et l'étude de phénomènes collectifs à partir de la description du comportement d'entités individuelles. Il s'agit d'une approche individu-centrée qui va chercher la source des dynamiques d'ensemble dans les comportements individuels.

La logique de modélisation SMA peut être synthétisée de la façon suivante (Marilleau et Gaudou, 2017) :

1. définir un phénomène collectif à étudier/comprendre. C'est-à-dire poser une question de modélisation (objectif) et des hypothèses sur l'objet modélisé ;
2. transcrire les hypothèses dans un modèle de comportement et de données au niveau des individus. Ce qui revient concrètement à définir des agents, leurs caractéristiques (paramètres) et les lois d'interactions entre agents (comportement) ;
3. définir l'organisation du modèle adaptée pour représenter les comportements individuels du point de vue spatial et temporel ;
4. enfin, définir l'environnement du modèle, c'est-à-dire l'ensemble des objets présents dans le modèle et extérieurs aux agents.

L'ensemble de ces éléments conduit à construire des règles et des processus qui permettent de passer d'un état donné (t) à l'état suivant (t+1). Pour finaliser le modèle il reste ensuite à définir un état initial et des conditions de fin.

Une telle approche est nécessairement conceptuelle. En effet, la modélisation multi-agents appréhende les phénomènes réels sous la forme d'individus avec leurs paramètres et leurs règles de comportement. Il s'agit donc de définir des concepts qui vont traduire un phénomène observé. Cette représentation de la réalité ne permet pas de modéliser les phénomènes réels par une approche « physique ». Par exemple pour représenter le ruissellement de l'eau, au lieu

d'utiliser une loi d'écoulement issue de l'hydraulique (approche physique), une approche multi-agents va définir des individus (goutte d'eau) et des règles de déplacement (« si telle condition est remplie, déplace-toi de telle façon »).

L'avantage principal de l'approche multi-agents réside dans le fait que les hypothèses sont émises au niveau individuel mais que les points d'observations (les résultats) sont multiples et peuvent être à la fois considérés au niveau individuel et/ou collectif. Par exemple, lors de la simulation du ruissellement il est possible de suivre la trajectoire d'une goutte d'eau (niveau individuel) et d'observer également les hauteurs de ruissellement sur l'ensemble de l'espace considéré (niveau collectif). Cet avantage offre une réponse intéressante à l'un des enjeux de la modélisation en hydrologie urbaine qui consiste à étudier des phénomènes qui sont nécessairement globaux (le ruissellement à l'échelle d'un bassin versant par exemple) mais déterminés par des comportements très localisés (une place de parking en revêtements perméables par exemple). En définissant les hypothèses au niveau individuel, la prise en compte des hétérogénéités locales peut être parfaitement assurée tout en permettant l'observation à l'échelle globale par agrégation des comportements individuels.

Les inconvénients de cette approche résident notamment dans le fait qu'elle ne reproduit qu'une partie de la complexité des phénomènes réels étudiés et qu'il peut être difficile d'identifier les liens entre l'échelle individuelle et collective qui expliquent les résultats obtenus.

Enfin, cette approche conceptuelle basée sur les individus simplifie la représentation des phénomènes et réduit le besoin en données d'entrée, mais dans le même temps, elle rend plus difficile le calage et la vérification du modèle obtenu.

4.1.1.2 LE LOGICIEL NETLOGO

Différentes plateformes de programmation existent pour réaliser des modèles multi-agents, les plus courantes étant Netlogo (Wilensky et Rand, 2015), Repast Simphony (North et al., 2013) et GAMA (Amouroux et al., 2007; Taillandier et al., 2010). Netlogo est utilisé ici avant tout pour des questions pratiques de formation et de simplicité de prise en main (1.3.3.3). Ce choix a permis un développement rapide du modèle mais comporte des limites, notamment dans le nombre maximum d'agents modélisables[21] et l'optimisation du temps de calcul.

Netlogo est un environnement de modélisation multi-agents écrit par URI WILENSKY et développé au CCL[22]. C'est un logiciel open source largement utilisé à des fins pédagogiques. L'environnement de Netlogo présente trois onglets (fenêtres) : une interface graphique, une page d'information et le code du modèle. Netlogo permet d'éditer le code, de le compiler avec une vérification et un affichage des erreurs éventuelles, de l'exécuter et d'en afficher les résultats.

- Dans l'onglet (fenêtre) d'interface graphique l'utilisateur peut définir et placer différents objets pour interagir avec le modèle (bouton, curseur, sélecteur, commutateur et champ de valeur libre) et pour visualiser les résultats (zone d'affichage ou d'exportation d'une valeur, et graphique de suivi). Surtout cet interface comprend l'affichage du « Monde » (domaine de modélisation) qui peut être torique (les cellules de gauches sont considérées voisines de

[21] En effet, si le logiciel Netlogo ne fixe pas de limite au nombre d'agents en théorie, dans la pratique le nombre maximum d'agents modélisable est limité par la RAM disponible.
[22] CCL : Northwestern's Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling

celle de droite, idem haut-bas) ou non, et dont la taille (nombre de cellules par ligne et par colonne, taille d'une cellule) est personnalisable. Enfin, cette interface comprend un compte « ticks » (nombre de pas de modélisation) utilisé pour représenter le temps.

L'interface graphique est le lieu principal d'utilisation du modèle, c'est depuis cet onglet que la simulation est lancée (généralement par un bouton « *GO* ») et que les résultats sont observés. Depuis cette interface, l'utilisateur accède également à certains outils comme le « BehaviorSpace » qui permet de construire et lancer un plan d'expérience.

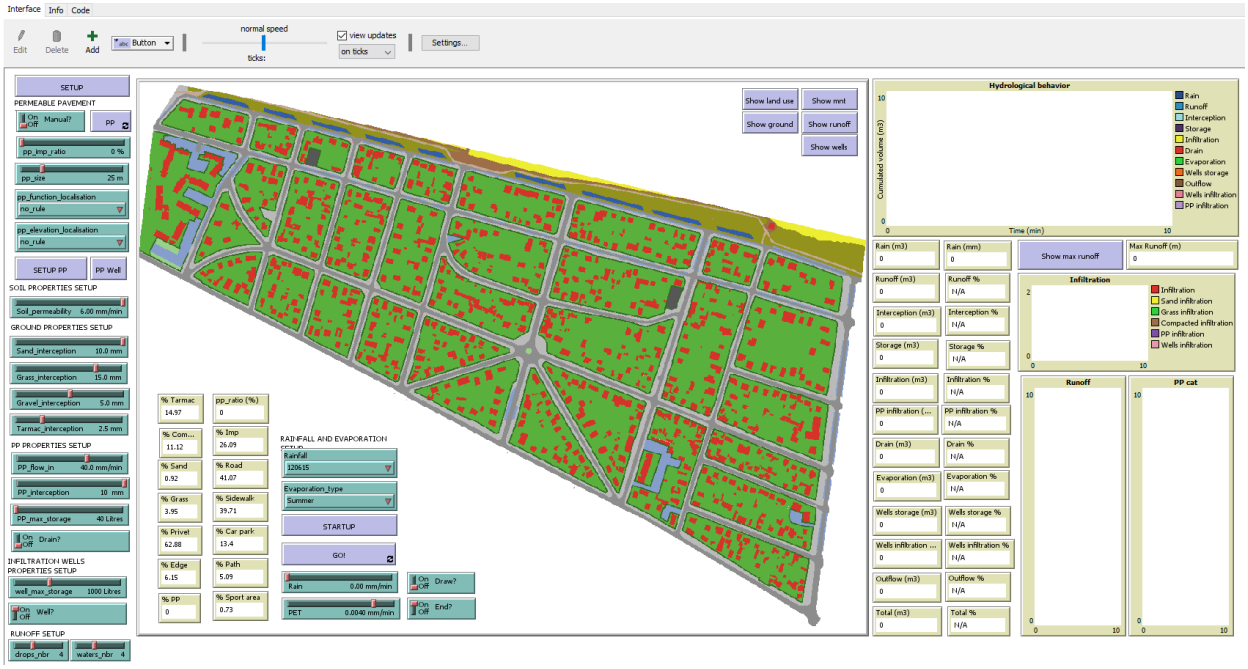


Figure 4.2 - Visualisation de l'interface graphique du modèle *PorousCity*. En gris, les boutons, en vert les objets qui permettent de définir des données d'entrée, en jaune les sorties du modèle sous forme numérique ou graphique, enfin la zone au centre est l'espace de visualisation du domaine de modélisation.

- L'onglet « Info » constitue une page d'information structurée en neuf sections, chacune étant éditable pour décrire le modèle, comment il fonctionne, comment l'utiliser, qui en est l'auteur, etc.
- Enfin, l'onglet « Code » est un éditeur de code adapté à la modélisation multi-agents. Le langage utilisé est propre à Netlogo et comprend tout une librairie de fonctions déjà construites et utilisables dans le code. Le code commence par préciser les extensions éventuelles utilisées et par donner la liste des variables et des attributs de chaque entité du modèle. Ensuite, l'ensemble du code est une succession de procédures, codées lors du développement et qui peuvent ensuite être appelées par d'autres procédures ou par les boutons de l'interface graphique. Le code complet de *PorousCity* est présenté en Annexe F.

  À titre d'exemple, la procédure suivante permet de définir une couleur d'affichage rose aux cellules contenant un puits d'infiltration (*pwell* = '1', sinon '0'). Cette procédure est appelée lors de l'initialisation du modèle pour mettre à jour l'affichage du bassin versant.

```
to set_color_well ;; set the color of the patches with an infiltration well
  ask patches with [pwell = 1]
  [ set pcolor pink ]
end
```

Pour terminer cette présentation succincte de Netlogo, il est important de noter que le logiciel reconnait trois types d'agents : les *patchs* (cellules), les *turtles* (tortues), et les *links* (liens). Seuls les deux premiers sont utilisés dans le code *PorousCity*. Les tortues sont des agents mobiles qui peuvent interagir entre elles et avec les cellules sur lesquelles elles se trouvent. Les cellules sont les agents qui forment le monde (domaine de modélisation), elles possèdent un certain nombre d'attributs (comme un type de revêtement par exemple). Une cellule peut contenir zéro, une ou plusieurs tortues, en revanche, une tortue ne peut être que sur une et une seule cellule à la fois.

4.1.1.3 LE PROTOCOLE ODD, UN OUTIL AU SERVICE DE LA DESCRIPTION DES MODÈLES

La modélisation multi-agents est de plus en plus utilisée par différentes disciplines scientifiques (géographie, écologie, sociologie, etc.). Afin de faciliter la compréhension, la validité et la reproductibilité des modèles, une équipe de chercheurs (Grimm et al., 2006, 2010) a proposé un protocole de présentation des modèles de type multi-agents appelé ODD (Overview, Design concepts, and Details). Ce protocole a le mérite d'organiser la présentation des modèles et de donner un langage commun pour faciliter la lecture et la réutilisation des travaux. L'objectif étant que le lecteur soit en mesure de recoder le modèle à partir des informations fournies. Il se décompose en sept points présentés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Le protocole ODD, traduit de l'anglais d'après (Grimm et al., 2006)

Vue d'ensemble	1. Objectifs 2. Entités, paramètres et échelles (spatiales et temporelles) 3. Vue d'ensemble des processus et des enchainements	*Sous-section 4.1.2*
Concepts de modélisation	4. Les concepts de modélisation	*Sous-section 4.1.3*
Détails	5. Initialisation 6. Données d'entrée 7. Sous-modèles	*Sous-section 4.1.4*

Cette trame est suivie pour organiser la présentation du modèle *PorousCity* dans la suite de cette section. Ce choix donne une présentation non pas linéaire mais cyclique, chaque élément étant abordé à différentes reprises en présentant à chaque fois un niveau de détails différent. En fonction du niveau d'information souhaité, le lecteur pourra aller lire les sous-sections correspondantes.

4.1.2 VUE D'ENSEMBLE DU MODÈLE *POROUSCITY*

Cette sous-section vise à donner un aperçu d'ensemble du modèle et des choix faits dans la modélisation en réponse aux objectifs du départ (4.1.2.1). Elle détaille ensuite les différentes entités utilisées dans le modèle, leurs propriétés et dans quelles échelles d'espace/temps ces entités évoluent (4.1.2.2). Enfin, le fonctionnement du modèle est présenté en donnant un aperçu d'ensemble des processus et de leurs enchainements (4.1.2.4).

4.1.2.1 LES OBJECTIFS DU MODÈLE

Ce modèle vise à explorer les effets de l'occupation du sol sur les processus hydrologiques en milieu urbain. En particulier, il propose de tester les bénéfices de la mise en place de revêtements perméables dans un bassin versant urbain donné. Ces bénéfices sont estimés d'une part à partir de la réponse hydrologique du bassin versant (critère : favoriser l'infiltration et l'évaporation et diminuer le volume évacué par les réseaux d'eau pluviale ou ruisselée) et d'autre part à partir du ruissellement observé en surface (critère : limiter la hauteur d'eau ruisselée).

Cette approche conceptuelle ne prétend pas quantifier le ruissellement en donnant une valeur prédictive de la réalité. La quantification des bénéfices est estimée ici en s'intéressant aux valeurs relatives obtenues lors de différents scénarios, par rapport à un scénario de référence (correspondant à l'état actuel).

Cette quantification relative des bénéfices de l'utilisation des structures à revêtements perméables en milieu urbain cherche notamment à répondre aux questions suivantes :

- quelle est l'influence du ratio de surface imperméable/perméable ? Est-ce qu'un ratio optimum existe pour un contexte donné ?
- quelle est l'influence de la localisation des surfaces perméables ? Est-ce que des règles de localisation peuvent être identifiées pour optimiser la mise en œuvre de ces structures ?
- comment ces bénéfices évoluent-ils en fonction des conditions climatiques, et notamment de la pluviométrie ?

Les éléments de réponse à ces questions visent à améliorer la compréhension des impacts de l'utilisation des revêtements perméables et à accompagner leur utilisation.

4.1.2.2 LES ENTITÉS, LEURS PARAMÈTRES ET LES ÉCHELLES

Le modèle *PorousCity* est construit sur une représentation géographique de l'espace et sa dynamique simule un défilement du temps.

Les unités de bases utilisées dans le modèle sont les suivantes :

- temps : un pas de temps (un « tick ») = 1 minute ;
- espace horizontal (X et Y) : une cellule (patch) = 1 mètre par 1 mètre (1 m^2) ;
- espace vertical (altitude Z) : unité en millimètre.

Ainsi, à titre d'exemples, la pluie est exprimée en mm/min/m^2, et les volumes en litre (mm/m^2).

Le modèle repose sur l'utilisation d'agents « cellules » représentant la surface du sol, et d'agents « tortues » représentant l'eau en surface du sol (« drops ») ou dans les structures perméables (« waters »). Ces trois entités sont représentées sur le diagramme de classe suivant (Figure 4.3) et sont détaillées par la suite.

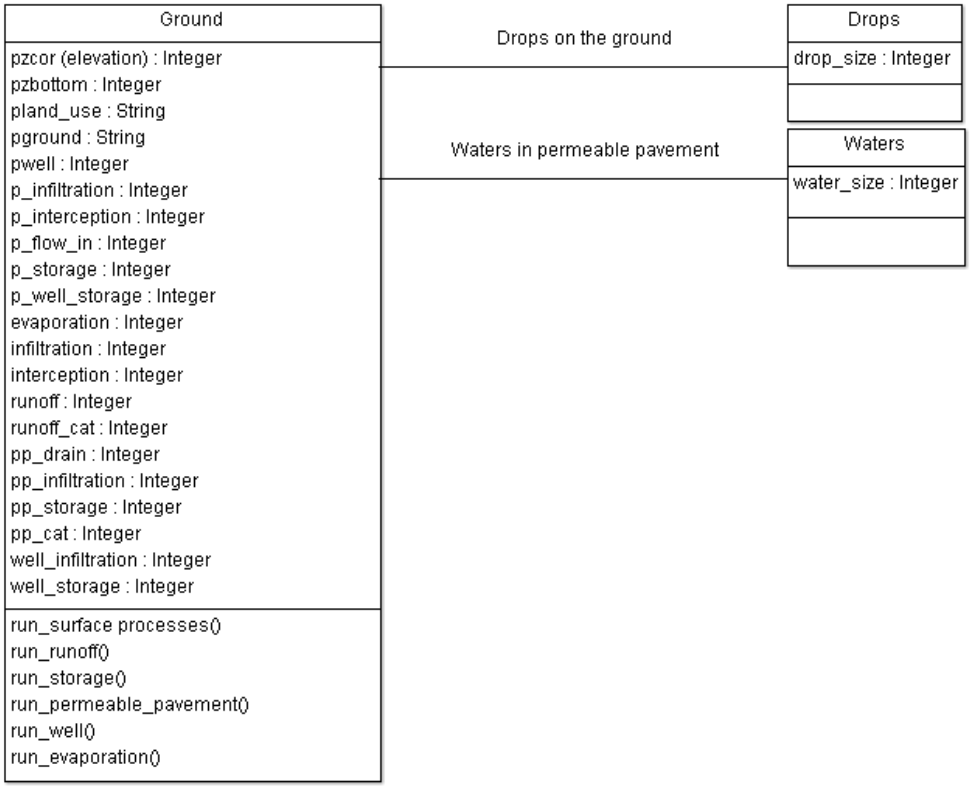


Figure 4.3 - Diagramme de classe présentant les trois entités utilisées dans le modèle *PorousCity*

a. Les cellules (patches)

Les entités de base du modèle sont les cellules (« patches »). Elles contiennent à la fois les données d'entrée nécessaires à la simulation, comme l'occupation du sol ou l'altitude (Tableau 4.2), et les données de sortie, les débits cumulés des différents processus hydrologiques notamment (Tableau 4.3).

Tableau 4.2 – Description des attributs des cellules correspondants aux paramètres fixés lors de l'initialisation

Nom de l'attribut	**Description**	**Unité**
pzcor	Altitude	mm
pzbottom	Altitude du fond de la structure *Seulement pour les revêtements perméables (RP)*	mm
pland_use	Occupation du sol (en fonction de l'usage) *Clôture, Dune, Jardin privé, Jardin public, Bâtiment, Route, Parking imperméable, Parking perméable, Piste piétonne, Piste cyclable, Plage, Terrain de sport, Trottoir.*	-
pground	Occupation du sol (en fonction du matériau) ⇨ Déduit de pland_use *Bitume, Clôture, Gravier, Herbe, Privé, Revêtement perméable (RP), Sable.*	-
pwell	Présence ou non d'un puit d'infiltration	1 = non 2 = oui
p_interception	Réservoir d'interception (ou de rétention pour les RP)	mm/m^2
p_infiltration	Capacité d'infiltration dans le sol	$mm/m^2/min$
p_flow_in	Capacité d'infiltration en surface *Seulement pour les RP*	$mm/m^2/min$
p_storage	Réservoir de rétention *Seulement pour les RP*	mm/m^2
p_well_storage	Réservoir de rétention *Seulement pour les puits d'infiltration*	mm/m^2

Tableau 4.3 - Détail des attributs des cellules correspondants aux résultats calculés par le modèle

Nom de l'attribut	Description	Unité
evaporation	Volume cumulé évaporé	mm/m^2
interception	Volume intercepté	mm/m^2
infiltration	Volume cumulé infiltré	mm/m^2
runoff	Volume de ruissellement (eau en surplus)	mm/m^2
pp_runoff	Indicateur de catégorie en fonction du volume ruisselé	-
pp_drain	Volume cumulé drainée *Seulement pour les RP*	mm/m^2
pp_infiltration	Volume cumulé infiltré depuis le fond de la structure *Seulement pour les RP*	mm/m^2
pp_storage	Volume stocké dans la structure *Seulement pour les RP*	mm/m^2
pp_cat	Indicateur de catégorie en fonction du volume cumulé infiltré *Seulement pour les RP*	-
well_infiltration	Volume cumulé infiltré depuis le puis d'infiltration *Seulement pour les puits d'infiltration*	mm/m^2
well_storage	Volume stocké dans le puis d'infiltration *Seulement pour les puits d'infiltration*	mm/m^2

b. Les agents (drops et waters)

Les agents *drops* et les agents *waters* correspondent respectivement à l'eau ruisselante en surface et à l'eau infiltrée à l'intérieur de la structure des cellules de type revêtements perméables.

Ces agents sont des agents temporaires, seulement créés à une étape de la modélisation (procédure *run_runoff* pour les agents *drops* et procédure *run_storage* pour les agents *waters*) et détruits ensuite. Comme le nom des procédures en question l'indique, ces deux types d'agents servent respectivement à la modélisation du ruissellement en surface (*drops*) et de l'écoulement de l'eau dans les structures perméables (*waters*). En effet, en plus de l'écoulement vertical, l'eau infiltrée dans la structure a une dynamique de sub-surface qui lui permet de s'écouler de proche en proche d'une cellule de type « revêtements perméables » (RP) à une autre.

Ces deux agents ont un seul attribut, leur taille, qui est fonction de la quantité d'eau présente dans la cellule au moment de la création des agents (Tableau 4.4).

Tableau 4.4 – Description de l'attribut des agents *drops* et *waters*

Nom de l'attribut	Description	Unité
drop_size / water_size	Volume d'eau contenu dans un agent *drops* / *waters*	L

4.1.2.3 LES VARIABLES GLOBALES

En plus des attributs des cellules et des agents, des variables globales permettent de définir l'environnement de la simulation. Ces variables sont utilisées pour caractériser les données d'entrée hydrologiques (infiltration, interception, volume de stockage, etc.) des différents types d'occupation du sol (Tableau 4.5), pour définir les règles d'implantation des surfaces perméables (Tableau 4.6), pour choisir les données d'entrée climatiques (Tableau 4.7) et enfin pour ajuster les variables de génération des agents *drops* et *waters*. Ces variables globales sont toutes ajustables par l'utilisateur dans l'interface graphique.

a. Variables hydrologiques

Les variables globales dites « hydrologiques » (Tableau 4.5) sont utilisées lors de la procédure *set_ground_properties* pour définir la valeur des attributs des cellules : *p_interception, p_infiltration, p_flow_in, p_storage* et *p_well_storage* en fonction du type de matériaux d'occupation du sol (*pground*).

Tableau 4.5 – Variables globales de caractérisation des propriétés hydrologiques des cellules.

Nom de la variable globale	Description	Unité
Soil_permeability	Capacité d'infiltration du sol	$mm/m^2/min$
Sand interception *Grass_interception* *Gravel_interception* *PP_interception* *Tarmac_interception*	Capacité d'interception du type d'occupation du sol correspondant *ou* Volume de rétention maximum pour les RP	mm/m^2
PP_flow_in	Volume d'infiltration en surface des revêtements perméables	$mm/m^2/min$
PP_max_storage	Volume de stockage maximum de la couche réservoir des revêtements perméables	mm/m^2
Drain?	Présence ou non d'un drain dans les structures perméables	Oui/non
Well_max_storage	Volume de stockage maximum dans les puits d'infiltration	mm/m^2
Well?	Modélisation ou non des puits d'infiltration	Oui/non

b. Variables d'implantation des revêtements perméables (RP)

Quatre variables globales sont utilisées pour définir les règles d'implantation des revêtements perméables (Tableau 4.6). En jouant sur ces quatre variables, l'utilisateur définit des règles pour l'implantation automatisée des RP. Cette implantation peut être entièrement aléatoire, si aucune règle ne la contraint ou ne présenter aucun caractère aléatoire, si une règle de préférence d'altitude est utilisée. Pour implanter des revêtements perméables, le code modifie le type d'occupation du sol (*pland_use* et *pground*) des patches concernés jusqu'à atteindre le ratio *pp_imp_ratio* (ratio de surface perméable sur la surface imperméable) souhaité.

Ces règles d'implantation sont utilisées dans le but d'explorer l'influence de la proportion et de la localisation des revêtements perméables sur leurs impacts et ainsi répondre aux objectifs initiaux (4.1.2.1). L'utilisateur peut également choisir d'implanter manuellement les revêtements perméables en utilisant la souris pour désigner les cellules à convertir en RP.

Tableau 4.6 - Variables globales correspondants aux règles d'implantation des revêtements perméables.

Nom de la variable globale	Description	Unité
pp_imp_ratio	Ratio de revêtement perméable/ revêtement imperméable (graviers compactés + bitume)	%
pp_size	Diamètre de la surface d'une implantation de RP	mètre
pp_function_localisation	Règle de priorité pour l'implantation des RP concernant le type d'occupation du sol : *Pas de règle, Route, Parking imperméable, Parking perméable, Piste piétonne, Piste cyclable, Terrain de sport, Trottoir.*	-
pp_elevation_localisation	Règle de priorité pour l'implantation des RP concernant l'altitude : *Pas de règle, Haut, Bas.*	-

c. Variables climatiques

Les variables climatiques *Rainfall* et *Evaporation* permettent à l'utilisateur de choisir l'événement pluviométrique à simuler (parmi ceux définis dans la Section 2.4) et la saison (été ou hivers) ce qui influence la valeur d'évapotranspiration potentielle (ETP) à utiliser.

Les curseurs *Rain* et *PET* représentent quant-à-eux la valeur de pluie ou d'ETP appliquée à chaque pas de temps. Si l'utilisateur a choisi un événement pluviométrique à simuler, la valeur *Rain* est pilotée par le modèle à chaque pas de temps pour décrire le hyétogramme de la pluie modélisée. Cette valeur peut également être définie manuellement par l'utilisateur.

Tableau 4.7 - Variables globales de définition des valeurs de pluies et d'évaporation potentielle.

Nom de la variable globale	Description	Unité
Rainfall	Permet de choisir un hyétogramme prédéfinie. Une option « manuelle » est disponible, l'utilisateur « joue » alors directement sur la variable *Rain*.	-
Rain	Définie la pluie appliquée sur chaque patch à chaque pas de temps (tick).	$mm/m^2/min$
Evaporation	ETP, deux saisons prédéfinies pour la Normandie (été ou hiver)	-
PET	Définie l'ETP (évaporation) appliquée hors des périodes de pluie à chaque pas de temps (tick).	$mm/m^2/min$

d. Variables de modélisation

Enfin, deux variables de « modélisation » sont utilisées pour ajuster la modélisation numérique des écoulements : *drops_nbr* pour les écoulements de surface (ruissellement), et *waters_nbr* pour les écoulements dans les structures perméables. Concrètement, ces variables définissent le nombre d'agents *drops* et *waters* créés à chaque pas de calcul par cellule.

4.1.2.4 LE FONCTIONNEMENT DU MODÈLE : PROCESSUS ET ENCHAINEMENTS

Trois commandes sont utilisées dans le modèle pour lancer les différentes procédures :

A. *SETUP* : commande qui permet d'importer les données nécessaires à la représentation du bassin versant dans le modèle ;

B. *STARTUP* : commande qui initialise les variables de la simulation (notamment les indicateurs de sortie) sans modifier le paramétrage du bassin versant ;

C. *GO* : commande qui lance la simulation. Cette commande exécute l'ensemble des procédures qui permettent de passer du pas de temps t au pas de temps $t+1$. La commande *GO* est répétée en boucle tant que la condition de fin n'est pas atteinte.

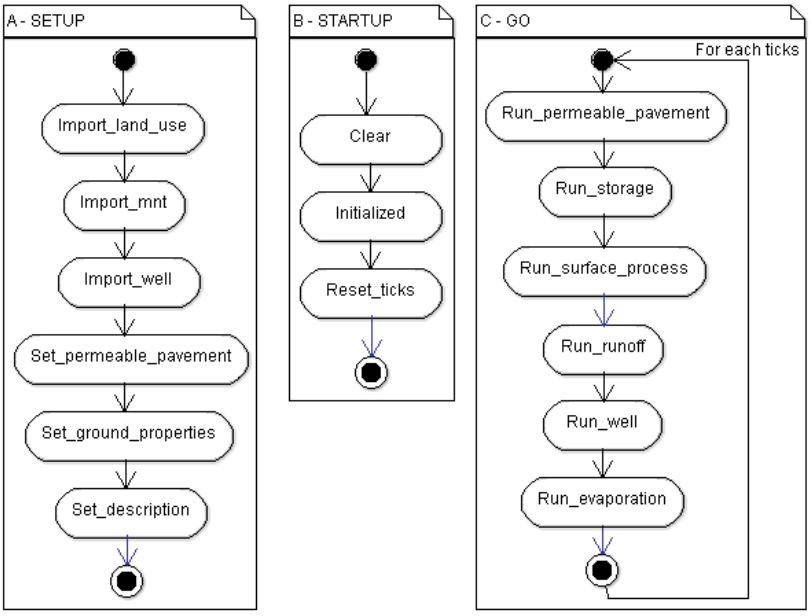


Figure 4.4 - Diagramme d'activité du modèle *PorousCity*

Certaines procédures, comme celles commandant les changements de couleurs de l'affichage graphique, ne sont pas représentées sur la Figure 4.4 pour alléger la lecture. Pour faciliter la compréhension du code, le nom des procédures commencent par un mot clef qui renvoie à leur rôle dans le modèle :

- **Import :** procédures utilisées pour charger des données d'entrées, appelées par la commande *SETUP* ;
- **Rain :** procédures utilisées pour décrire les données pluviométriques. Ces données sont appelées par la commande *GO* ;
- **Run :** procédures utilisées pour simuler les différents processus hydrologiques. Elles forment le cœur du modèle et sont successivement appelées par la commande *GO* ;
- **Set :** procédures utilisées pour modifier l'affichage graphique (couleur des cellules), pour mettre à jour la valeur de certains indicateurs, et pour paramétrer les propriétés du bassin versant lors de la phase *SETUP*.

Lors de l'exécution de la commande *GO*, les procédures, *Run_permeable_pavement*, *Run_storage*, *Run_surface_processes*, *Run_runoff*, *Run_well* et *Run_evaporation* sont appelées successivement pour simuler une minute. Chacune des procédures appelées permet de simuler une partie du comportement hydrologique du bassin versant. L'ordre dans lequel s'enchainent les procédures de la commande *GO* est particulièrement important. Les raisons qui justifient cet enchainement sont développées dans la sous-section 4.1.3.

Ces procédures (à l'exception de *Run_Well*) sont représentées dans la Figure 4.5.

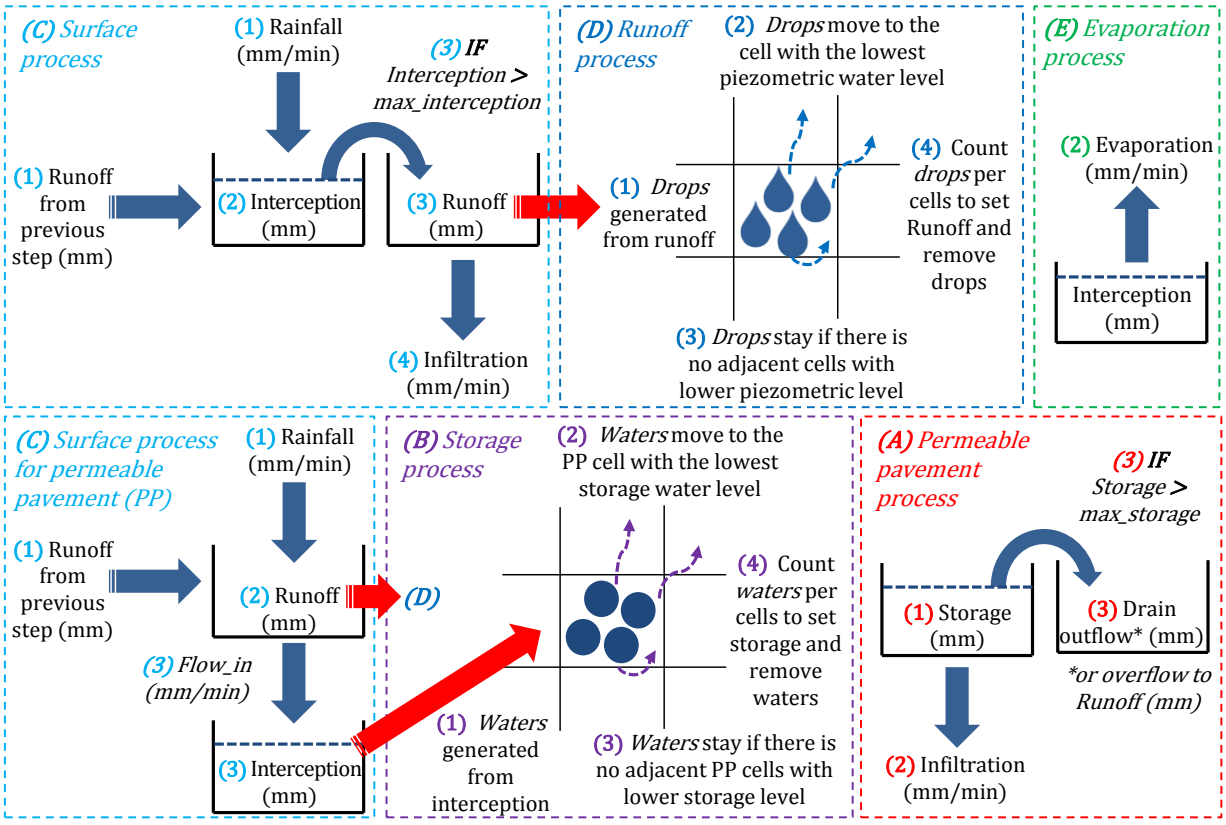


Figure 4.5 – Représentation schématique de la modélisation des processus hydrologiques sur une cellule du modèle pour un pas de temps. La lettre qui précède le nom du processus renvoie à son ordre d'exécution.

Ces procédures permettent de faire évoluer les volumes d'eau stockée dans les différents niveaux de réservoirs des cellules (interception, ruissellement, stockage), soit par un processus d'évacuation (infiltration, évaporation, drain), soit par un processus de transfert (écoulement de surface ou de sub-surface dans les structures perméables). Toutes ces procédures sont détaillées individuellement dans la sous-section 4.1.4.

4.1.3 LES CONCEPTS DE MODÉLISATION DE *POROUSCITY*

Cette sous-section complète et approfondit la précédente. Elle précise les concepts et hypothèses de modélisation utilisés. Dans le protocole ODD original, cette partie comprend de nombreuses sous-catégories, seules celles pertinentes pour la description du modèle *PorousCity* sont présentées ici. Elles portent sur :

- les principes de modélisation des processus réels (4.1.3.1) ;
- les interactions entre les agents (4.1.3.2) ;
- la place de la stochasticité dans la modélisation des processus (4.1.3.3)
- les agréations d'agents possibles, pour former des entités collectives (4.1.3.4) ;
- et les indicateurs et d'observations de sortie (4.1.3.5).

Les catégories visant à présenter les capacités d'adaptation, d'apprentissage, de prédiction ou de perception des agents ne sont pas renseignées puisqu'elles n'ont pas d'objet dans le modèle *PorousCity*.

4.1.3.1 CONCEPTS ET PRINCIPES GÉNÉRAUX

a. Décomposition des processus hydrologiques

Le modèle *PorousCity* repose sur l'idée que les différents processus hydrologiques peuvent être décomposés et résolus à l'échelle d'une cellule de 1 m^2. Ainsi, comme présenté sur la Figure 4.5 et la Figure 4.6, le modèle part d'une quantité d'eau en entrée puis applique une série de fonctions réservoir et de flux pour obtenir un volume d'eau dit de ruissellement qui reste en excès au-dessus de la cellule. La modélisation définit un ordre d'exécution des différents processus qui vise à représenter la dynamique selon laquelle les processus interviennent.

La Figure 4.6 illustre la décomposition des processus hydrologiques pour une cellule sans revêtement perméable ni puits d'infiltration. La variable *Interception* représente un réservoir avec une hauteur de stockage maximum. La variable *Runoff* correspond à la lame d'eau libre en excès au-dessus de la surface.

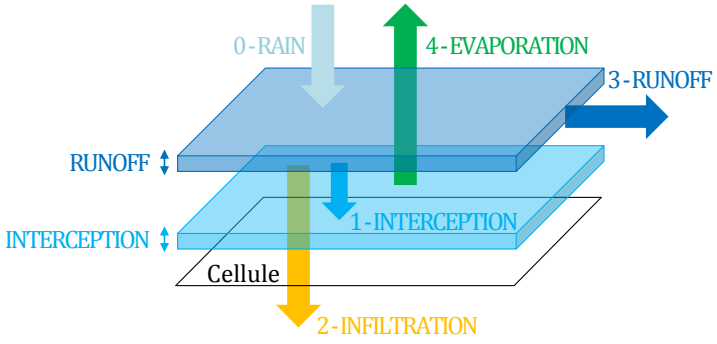


Figure 4.6 - Schématisation de la décomposition des processus hydrologiques à l'échelle d'une cellule sans revêtement perméable ni puits d'infiltration. Les chiffres indiquent l'ordre d'exécution des processus.

Le passage du volume de ruissellement au pas de temps *t*-1 à celui au temps *t*, pour une cellule sans revêtement perméable ni puits d'infiltration, peut être résumé par l'Équation 4.1 qui donne, dans leur ordre d'intervention, les différents flux ou volumes ajoutés ou retirés.

Équation 4.1 – Équation bilan du ruissellement : cellule simple

$$V_{Runoff}(t-1) + \left[Q_{Rain}(t) - \Delta_{Interception}(t) - Q_{Infiltration}(t) + \Delta_{Runoff}(t) - Q_{Evaporation}(t)\right] = V_{Runoff}(t)$$

Avec : V (L) qui représente un volume, Q (L/s) qui représente un flux (entrant ou sortant) et Δ (L) qui représente une variation de volume.

b. Modélisation de l'écoulement de l'eau en surface

Lors de l'étape de ruissellement, chaque cellule possède une lame d'eau en surface appelée *Runoff* (qui peut être nulle). Le modèle repose alors sur le principe suivant ; l'eau en excès au-dessus de chaque cellule peut s'écouler vers une cellule voisine si son niveau piézométrique est inférieur à celui de la cellule de départ. Pour cela, le volume de ruissellement est décomposé en un nombre fixe d'agents *drops* qui se partagent le volume d'eau présent. Ces agents se déplacent ensuite, le cas échéant, vers la cellule adjacente dont le niveau piézométrique est le plus faible. Cette étape repose ainsi principalement sur l'attribut *pzcor* qui renseigne l'altitude de chaque cellule et sur la localisation des agents *drops* qui représentent la lame d'eau de ruissellement.

Dans Netlogo deux notions de voisinage peuvent être utilisées :

- un voisinage strict, où seules les quatre cellules qui possèdent un côté en commun avec la cellule active sont considérées adjacentes ;
- un voisinage large, où les huit cellules qui possèdent au moins un coin en commun avec la cellule active sont considérées adjacentes.

La seconde notion de voisinage est utilisée dans le modèle *PorousCity* pour ne pas créer une contrainte sur les écoulements.

Ce choix de modélisation du ruissellement induit une vitesse de déplacement fixe, de 1 mètre par minute (déplacement vertical ou horizontal) ou de 1,41 ($\sqrt{2}$) mètre par minute (déplacement en diagonale), et conduit à une circulation de l'eau qui vise à équilibrer le niveau piézométrique de l'ensemble des cellules.

c. Modélisation des avaloirs (puits d'infiltration)

En milieu urbain, en plus des processus hydrologiques listés précédemment, il convient d'ajouter un processus d'écoulement vers les réseaux ou autres ouvrages enterrés de gestion des eaux de pluie. L'interaction entre ces ouvrages et les écoulements de surface intervient au niveau des avaloirs. Dans le modèle *PorousCity*, cette interaction est représentée grâce à un troisième attribut, *pwell*, qui vaut '1' si la cellule contient un avaloir, '0' dans le cas contraire.

L'écoulement vers l'avaloir intervient après l'étape d'infiltration de surface ; tout ou partie de l'eau présente en excès en surface de la cellule (*runoff*) est alors évacuée par l'avaloir.

Cette règle implique de modéliser le devenir de l'eau évacuée vers les avaloirs. Ce devenir est différent en fonction du type d'ouvrage concerné : réseau d'évacuation d'eau, puits d'infiltration, réservoir de stockage, etc. Comme le terrain d'étude ne comprend que des puits d'infiltration et

pas de réseaux ou autres ouvrages, seuls ces premiers sont modélisés. Une procédure dédiée, *Run_well*, permet alors de représenter leur fonctionnement hydrologique sous la forme d'un ouvrage de type réservoir avec évacuation par infiltration (Équation 4.2).

Équation 4.2 – Équation réservoir : puits d'infiltration

$$Q_{Well} = \Delta_{Storage} + Q_{Infiltration}$$

La Figure 4.7 illustre la décomposition des processus hydrologiques dans le cas d'une cellule avec un puits d'infiltration. La variable *Storage* représente le réservoir de stockage de l'eau dans le puits. Le volume stocké est limité par une hauteur de stockage maximum, si le puits est rempli, le ruissellement n'est plus évacué par l'avaloir et reste en excès au-dessus de la cellule sous la forme d'une lame d'eau de ruissellement, *Runoff*. Ce volume de ruissellement peut alors s'écouler vers les cellules adjacentes selon les règles précisées ci-dessus.

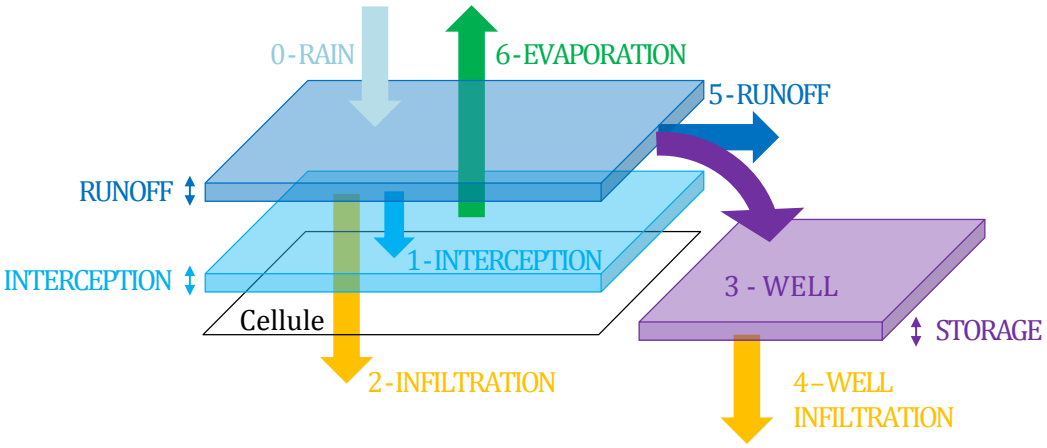


Figure 4.7 - Schématisation de la décomposition des processus hydrologiques à l'échelle d'une cellule avec puits d'infiltration. Les chiffres indiquent l'ordre d'exécution des processus.

d. Modélisation des revêtements perméables

Les différents principes de modélisation présentés précédemment permettent de représenter l'état actuel du bassin versant étudié. Le cœur de la démarche de modélisation consiste alors à transformer certaines cellules en revêtements perméables en modifiant leur attribut *pground*.

Cette modification change alors les règles suivies pour la modélisation du processus d'infiltration qui sont remplacées par une règle de flux entrant (Équation 4.3) et deux réservoirs (Figure 4.6), le premier dit de rétention (*interception*) avec une évacuation par évaporation et percolation et le second dit de stockage (*storage*) avec une évacuation par infiltration et drainage.

Équation 4.3 – Équation bilan du ruissellement : cellule avec revêtements perméables

$$V_{Runoff}(t-1) + \left[Q_{Rain}(t) - Q_{Flow\_in}(t) + \Delta_{Runoff}(t) - Q_{Evaporation}(t)\right] = V_{Runoff}(t)$$

La Figure 4.8 schématise la décomposition des processus hydrologiques pour une cellule de type revêtement perméable. Cette décomposition reprend celle proposée à la fin du chapitre 3 comme synthèse du comportement hydrologique des structures perméables.

Les deux réservoirs de rétention (*Interception*) et de stockage (*Storage*) sont représentés sur le schéma, et par les équations 4.4 et 4.5.

Équation 4.4 – Équation réservoir : Rétention dans les RP

$$Q_{Flow\_in} = \Delta_{Interception} + Q_{Percolation} + Q_{Evaporation}$$

Équation 4.5 – Équation réservoir : Stockage dans les RP

$$Q_{Percolation} = \Delta_{Storage} + Q_{Waterflow} + Q_{Inflitration} + Q_{Drainage}$$

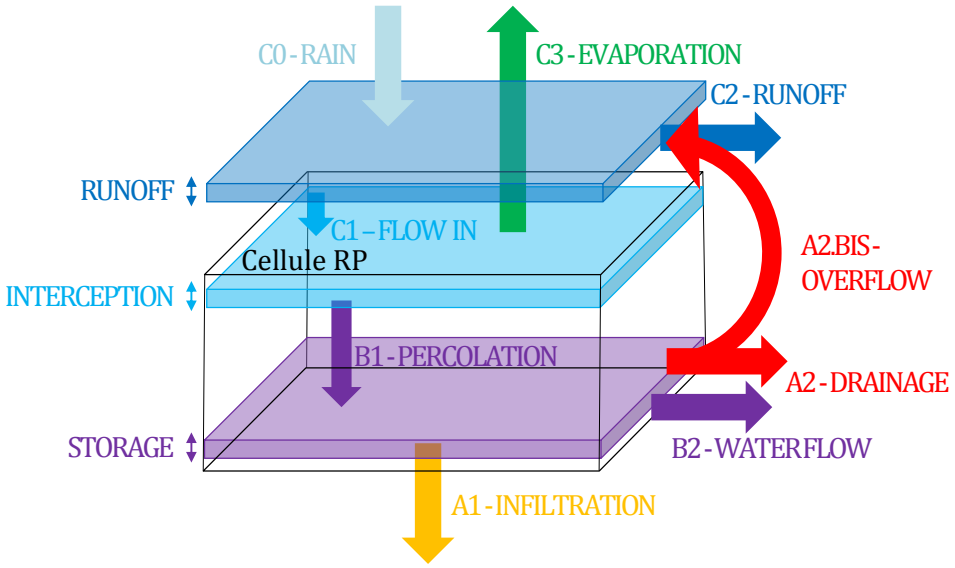


Figure 4.8 - Schématisation de la décomposition des processus hydrologiques à l'échelle d'une cellule de type revêtement perméable. Les lettres et les chiffres indiquent l'ordre d'exécution des processus.

La procédure *run_storage* (4.1.4.3.b) assure la fonction de transfert entre les couches de surface et la couche de fondation identifiée au chapitre 3 et l'écoulement de l'eau dans la fondation. Elle est représentée sur le schéma par le flux dit de « Percolation » et celui nommé « Water_flow ».

Le flux « Percolation » correspond à l'écoulement vertical de l'eau depuis la surface de la structure (réservoir de rétention) vers la fondation (réservoir de stockage). Pour qu'un écoulement ait lieu, pendant l'événement pluvieux, il faut que le volume stocké dans le réservoir de rétention soit supérieur au seuil fixé par la variable *p_interception* de la cellule. Cette règle permet de modéliser la rétention de l'eau dans les couches de surface en début d'événement pluvieux mise en évidence au chapitre 3. Après l'événement pluvieux l'eau du réservoir de rétention continue de s'écouler vers la fondation jusqu'à un seuil arbitraire correspondant à un dixième du volume de rétention maximum. L'eau restante dans le réservoir de rétention est évacuée par évaporation, en revanche, l'eau qui s'est écoulée jusqu'à la couche de fondation ne peut plus être évacuée par évaporation.

Le flux « Water flow » correspond à l'écoulement horizontal de l'eau dans la structure perméable. En effet, une fois au fond de la structure, l'eau peut s'écouler vers une partie de la fondation moins saturée. Ce processus d'écoulement est modélisé exactement comme l'écoulement de surface. Pour cela, les cellules de type RP possèdent une hauteur de fond de structure, *pzbottom* (calculée à partir de leur altitude de surface). L'eau stockée (*storage*) entraine l'existence d'un second niveau piézométrique, dans la structure. Un écoulement de la lame d'eau stockée a lieu de proche en proche, pour équilibrer la hauteur d'eau stockée entre les cellules de type RP qui composent la même structure perméable.

Un détail important du modèle doit être souligné ici ; l'ordre dans lequel la commande *GO* appelle les différentes procédures (Figure 4.4 et Figure 4.5) implique que les processus hydrologiques ne sont pas résolus sur le même pas de temps pour un même volume d'eau. Cet ordre de résolution des processus permet de modéliser le temps nécessaire pour l'écoulement de l'eau dans les revêtements perméables et induit un décalage entre l'entrée de l'eau dans la structure (*Flow_in*) et sa sortie par infiltration ou drainage.

Ces différents choix de modélisation reposent sur les observations et les conclusions établies lors de la modélisation à l'échelle de la structure (modèle *PermetAble*, chapitre 3). Il s'agit notamment, avec les deux réservoirs et la procédure *run_storage* de représenter les dynamiques de rétention et de front d'infiltration de l'eau dans la structure.

Concrètement : exemple de modélisation avec *PP_max_interception* = 1 mm et *PP_Flow_in* = 60 mm/min.

- **$t = 0$:**
  - *Run_permeable_process* : *Storage* = 0 rien ne se passe.
  - *Run_storage* : *Interception* = 0 rien ne se passe.
  - *Run_surface_process* : *Rain* = 1 mm[23] ⇨ *Interception* = 1 mm
- **$t = 1$ minute :**
  - *Run_permeable_process* : *Storage* = 0 rien ne se passe.
  - *Run_storage* : *Interception* = 1 mm ≤ *P_Interception* ⇨ pas de génération d'agents *waters*.
  - *Run_surface_process* : *Rain* = 1 mm ⇨ *Interception* = 2 mm
- **$t = 2$ minutes :**
  - *Run_permeable_process* : *Storage* = 0 rien ne se passe.
  - *Run_storage* : *Interception* = 2 mm > *P_Interception* ⇨ génération d'agents *waters, Interception* = 1 mm ⇨ écoulement des agents ⇨ suppression des agents et conversion en un volume stocké, *Storage* = 0,5 mm[24].
  - *Run_surface_process* : *Rain* = 1 mm ⇨ *Interception* = 2 mm
- **$t = 3$ minutes :**
  - *Run_permeable_process* : *Storage* = 0,5 mm ⇨ *Soil_permeability* = 0,1 mm/min ⇨ *Infiltration* = 0,1 mm et *Storage* = 0,4 mm.
  - *Run_storage* : *Interception* = 2 mm > *P_Interception* ⇨ génération d'agents *waters, Interception* = 1 mm ⇨ écoulement des agents ⇨ suppression des agents et conversion en un volume stocké, *Storage* = 0,9 mm.
  - *Run_surface_process* : *Rain* = 0 mm ⇨ *Interception* = 1 mm
  - *Run_evaporation* : *PET* = 0,01 mm/min ⇨ *Evaporation* = 0,01 mm et *Interception* = 0,99 mm.

4.1.3.2 INTERACTIONS ENTRE ENTITÉS DU MODÈLE

a. Le rôle des agents drops et waters

Les processus présentés ci-dessus sont modélisés indépendamment pour chaque cellule. Ces cellules n'interagissent pas directement entre-elles. Les interactions sont réalisées à l'aide des agents *drops* et *waters*, comme cela est présenté sur la Figure 4.5. Les agents *drops* et *waters* interagissent alors entre eux et avec les cellules pour déterminer leur cellule de destination. À noter que ces interactions n'ont pas lieu simultanément mais agent par agent.

b. Déconnection des espaces privés

Un des partis-pris de modélisation majeur du modèle *PorousCity* est de ne pas considérer les espaces privés autres que les parkings imperméables. Dans le modèle, cette hypothèse est traduite par deux aspects. D'une part les cellules avec comme attribut *pground* : 'private', 'edge'

[23] Les valeurs de pluie, d'évaporation et de perméabilité du sol sont exagérées ici pour la lisibilité de l'exemple.
[24] Estimation, l'écoulement des agents *waters* dépend des autres agents et des cellules autour.

ou ‘empty’ sont ignorées dans la modélisation de chacun des processus hydrologiques. D’autre part, un type d’occupation du sol spécifique a été ajouté, *pground* = ‘edge’, qui permet de représenter les cellules qui entourent les parcelles privées. La valeur d’altitude (*pzcor*) de ces cellules est artificiellement augmentée de 5 mètres ce qui permet de s’assurer que les agents *drops* ne s’écoulent pas depuis des cellules du domaine public vers les parcelles privées. Cette représentation permet de passer d’un total de 457 181 cellules pour l’ensemble du bassin versant, à 141 590 cellules dites « actives », comme cela est illustré par la Figure 4.9.

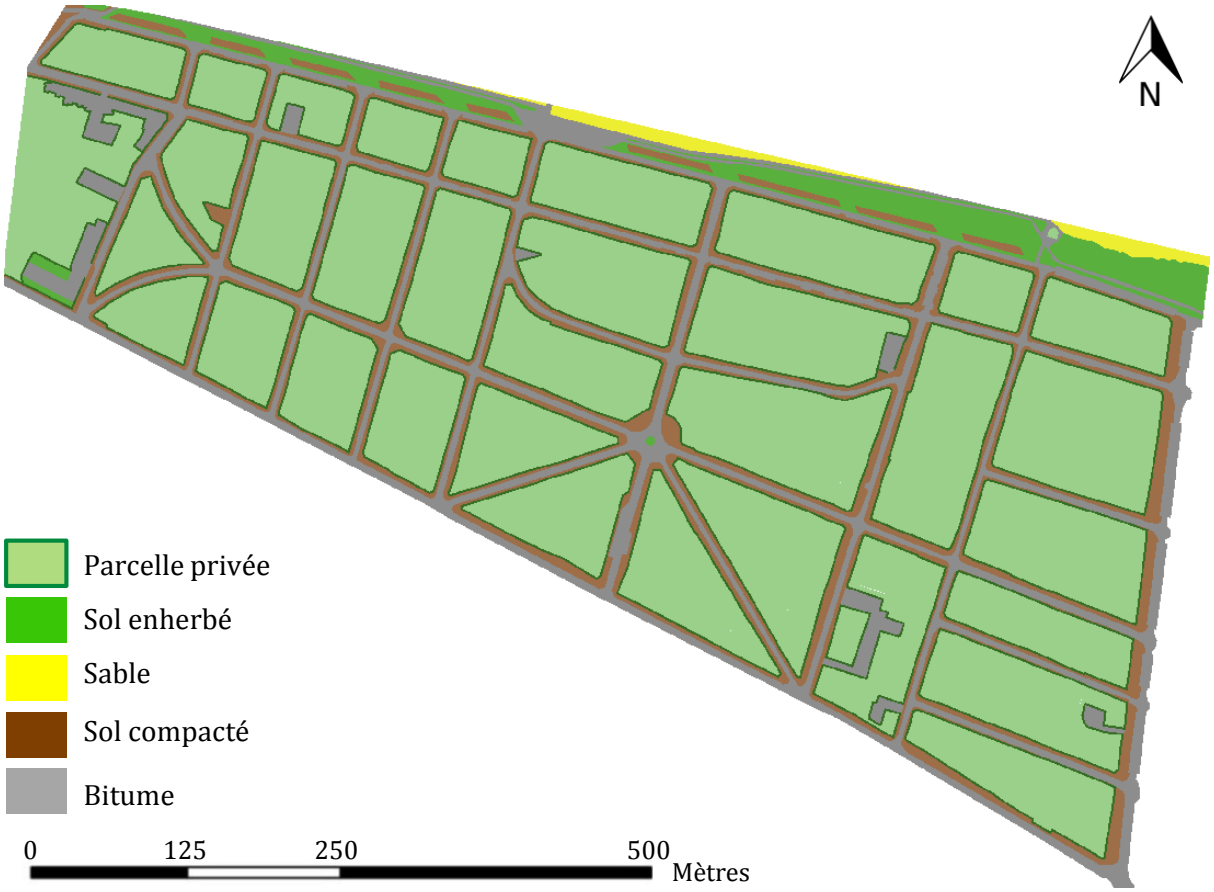


Figure 4.9 – Cartographie du type de revêtement de surface du bassin versant modélisé dans *PorousCity*. Les zones en vert clair correspondent aux espaces privés non considérés lors de la modélisation des processus hydrologiques.

Ce choix est principalement motivé par l’optimisation de la modélisation, les limites imposées du nombre d’agents par le logiciel Netlogo et la difficulté à caractériser l’occupation du sol sur les parcelles privées. Ce choix repose également sur la réalité du bassin versant étudié avec des parcelles privées qui contribuent peu ou pas au ruissellement. En effet, d’une part, les espaces privés sont, pour la plupart, végétalisés et situés sur la dune avec un coefficient de perméabilité important, et d’autre part, le règlement d’urbanisme impose une gestion des eaux pluviales à la parcelle. Ces aspects sont plus largement discutés dans la section 2.3.

Cependant, dans la réalité, la contribution de ces parcelles privées au ruissellement sur le domaine public n’est pas nulle et surtout, en sens inverse, ces parcelles constituent un exutoire pour le ruissellement du domaine public, notamment au niveau des descentes de garages et des clôtures végétalisées. Cette hypothèse ne permet donc pas de prétendre modéliser le fonctionnement réel du bassin versant. Elle explique notamment les valeurs de hauteur de ruissellement parfois extrêmes obtenues, quand l’eau est « piégée » contre des clôtures considérées imperméables alors qu’elles ne le sont pas dans la réalité.

4.1.3.3 STOCHASTICITÉ DE LA DYNAMIQUE DU MODÈLE

Le modèle *PorousCity* ne comprend pas de variables définies aléatoirement. Cependant, deux phénomènes dépendent d'un tirage aléatoire : l'écoulement de surface et l'écoulement entre cellules perméables. En effet, comme précisé ci-dessus, chaque agent interagit lors de son activation avec les agents des cellules voisines et de sa propre cellule pour déterminer son déplacement. Une fois sa destination connue, l'agent se déplace alors immédiatement. L'agent suivant détermine ainsi sa destination dans une configuration différente.

Ce choix de modélisation (agent par agent) confère donc une grande importance à l'ordre dans lequel les agents sont appelés. Pour éviter que cet ordre ne soit complètement aléatoire, les agents sont appelés par ordre de taille (*drops_size* ou *waters_size*) décroissant. Autrement dit, les volumes d'eau les plus importants se déplacent en premier. Cependant, il est très fréquent, voire systématique, que plusieurs agents transportent le même volume d'eau, le modèle détermine alors aléatoirement l'ordre de déplacement de ces agents.

L'influence de ces tirages aléatoires sur les résultats des simulations est estimée en répétant plusieurs fois chaque simulation. Les résultats obtenus sont présentés dans la section 4.2.

4.1.3.4 AGRÉGATION DES AGENTS

Les agents « cellule » ou « tortue » (*drops* et *waters*) sont signifiants individuellement, une cellule représente 1 m² de bassin versant, un agent *drops* ou *waters* représente un certain volume d'eau. Cependant des agents individuels peuvent également avoir une signification par agrégation dans certains cas particuliers :

- pour les agents *drops* et *waters* : l'agrégation évidente intervient à la fin des procédures *run_storage* et *run_runoff*, quand l'ensemble des agents *drops* ou *waters* présents sur une cellule sont regroupés pour mettre à jour, respectivement, la valeur des volumes *runoff* et *storage*.
- pour les cellules de type RP : en effet, pour implanter une structure perméable de 10 m², par exemple, il faut que dix cellules adjacentes aient comme attribut *pground* 'permeable pavement'. Ces dix cellules ont à la fois chacune une identité propre, et en même temps, elles forment une structure perméable. Cette agrégation est traduite par la règle d'écoulement des agents *waters* déjà présentée précédemment. Elle permet, au niveau hydrologique, de modéliser non pas dix revêtements perméables indépendants mais une unique structure.

4.1.3.5 OBSERVATIONS ET RÉSULTATS

Les indicateurs utilisés dans le modèle *PorousCity* peuvent être répartis en quatre ensembles :

1. des indicateurs de description du bassin versant qui calculent et affichent le pourcentage d'occupation du sol pour les différents usages et les différents matériaux ;
2. des indicateurs hydrologiques qui donnent à chaque pas de temps le volume total évacué par les différents processus hydrologiques (infiltration, évaporation, drainage, ruissellement à l'extérieur du bassin versant) et les volumes stockés dans les différents réservoirs (interception, stockage dans les structures à revêtements perméables, stockages dans les puits d'infiltration, et ruissellement de surface).

Pour pouvoir observer plus en détail les processus hydrologiques, le volume total infiltré est détaillé par type de revêtement de surface ou ouvrage (herbe, sable, gravier compacté, RP, et puits d'infiltration) ;

3. des indicateurs qui détaillent, à chaque pas de temps, la hauteur de ruissellement en surface en donnant le nombre de cellules par catégorie de hauteur.

   La répartition du nombre de cellules par catégorie de ruissellement est complétée par l'affichage de la hauteur de ruissellement maximum ;

4. des indicateurs qui détaillent à chaque pas de temps le volume total d'eau évacuée (infiltration, évaporation et drainage) par cellules de type revêtements perméables en donnant le nombre de cellules par catégorie de volume.

Les catégories utilisées pour la hauteur de ruissellement, et pour le volume total évacué par les cellules de type RP, sont les suivantes :

- Valeur = 0 cm : catégorie 0,
- Valeur > 0 cm et ≤ 1 cm : catégorie 1,
- Valeur > 1 cm et ≤ 5 cm : catégorie 2,
- Valeur > 5 cm et ≤ 10 cm : catégorie 3,
- Valeur > 10 cm et ≤ 20 cm : catégorie 4,
- Valeur > 20 cm et ≤ 30 cm : catégorie 5,
- Valeur > 30 cm et ≤ 40 cm : catégorie 6,
- Valeur > 40 cm et ≤ 50 cm : catégorie 7,
- Valeur > 50 cm et ≤ 1 mètre : catégorie 8,
- Valeur > 1 mètre : catégorie 9.

À chaque itération de la commande *GO* le modèle met à jour et affiche la valeur des indicateurs des ensembles 2, 3 et 4. Les indicateurs de l'ensemble 2 constituent les observations principales du modèle. Les ensembles 3 et 4 permettent de détailler ces résultats en quantifiant l'ampleur du ruissellement d'une part, et l'efficacité des structures à revêtements perméables d'autre part.

Pour l'ensemble 2, chaque valeur est donnée numériquement et en % du volume total de pluie. Les valeurs sont également tracées sur un graphique qui trace les différents hydrographes de sortie en fonction du temps et un qui trace le détail du volume infiltré en fonction du temps.

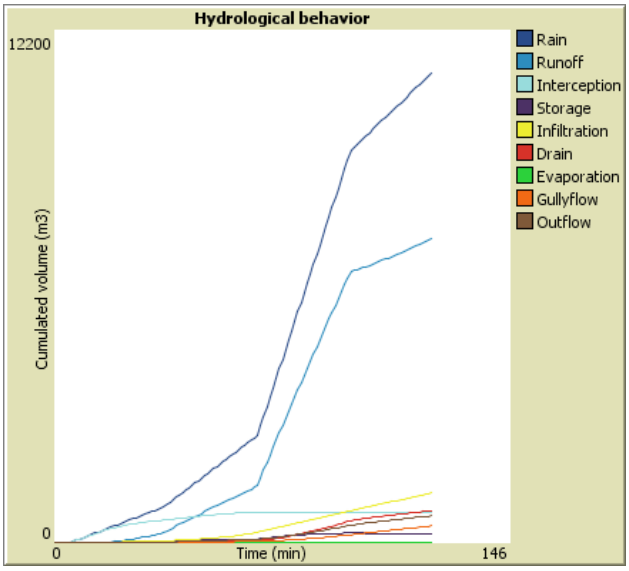


Figure 4.10 – Sortie du modèle *PorousCity*. Graphique de visualisation du volume de chaque processus hydrologiques en fonction du temps pour l'ensemble du bassin versant.

Pour les ensembles 3 et 4, un histogramme présente la répartition du nombre de cellules dans les différentes catégories.

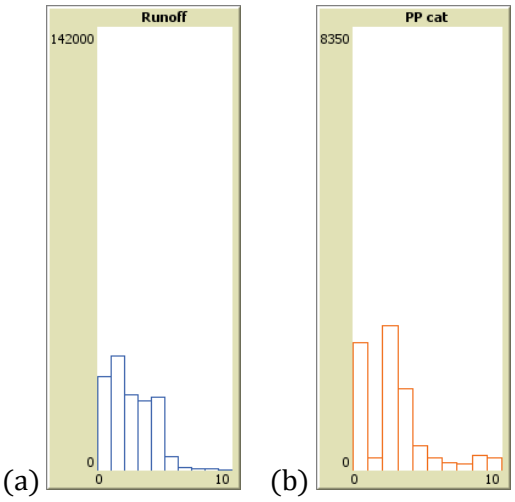


Figure 4.11 – Sortie du modèle *PorousCity*. (a) Visualisation du nombre de cellules actives dans chaque catégorie de ruissellement. (b) Visualisation du nombre de cellules de type RP dans chaque catégorie.

Enfin, en terme de visualisation graphique, la carte du bassin versant est mise à jour à chaque pas de temps avec une représentation de la hauteur ruisselée sous la forme d'un dégradé de bleu. La cellule étant d'autant plus foncée que la hauteur est importante. L'utilisateur peut également activer une option qui permet de suivre le déplacement des agents *drops* en surface.

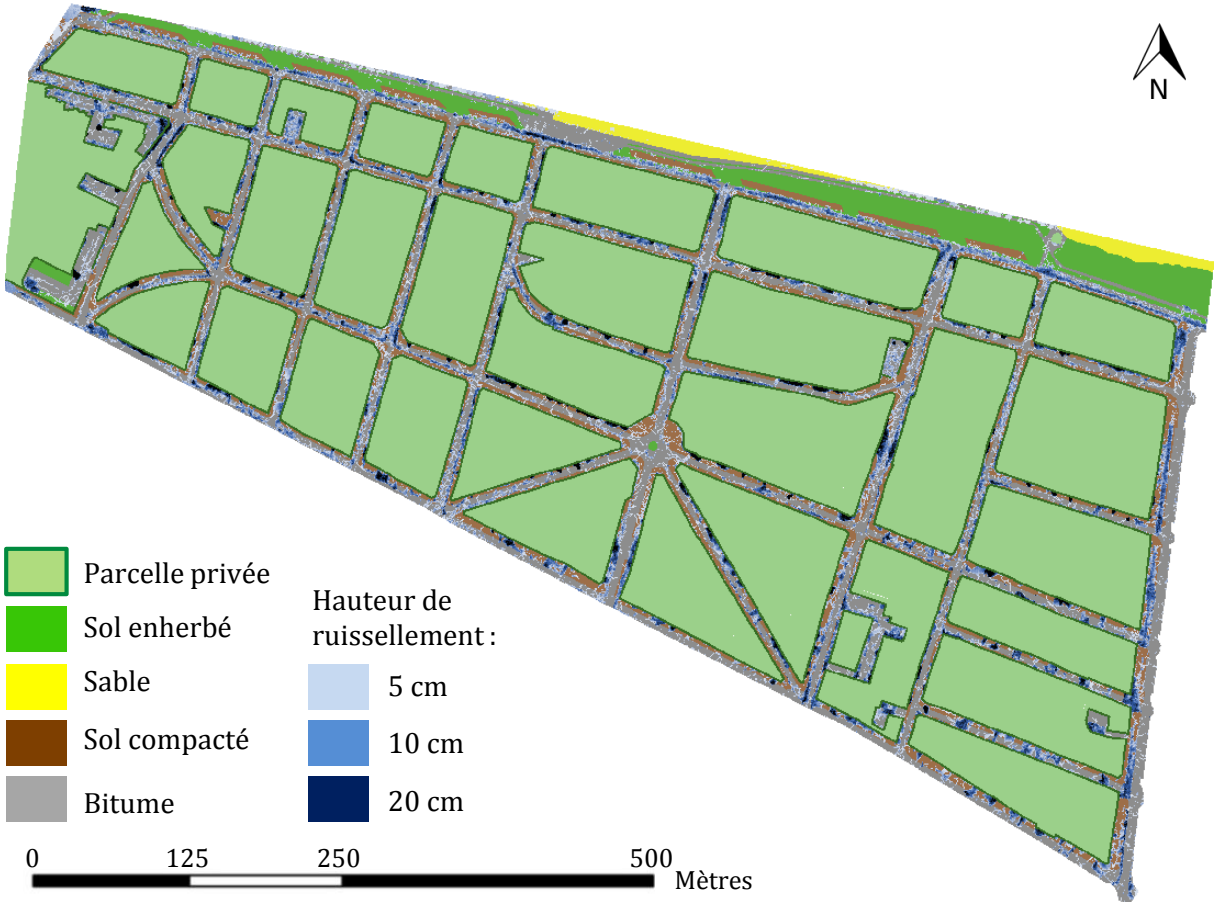


Figure 4.12 – Sortie du modèle *PorousCity*. Visualisation graphique de la hauteur de ruissellement sur les cellules actives par un dégradé de bleu.

Ces différents indicateurs et sorties graphiques permettent de quantifier les deux observations majeures du modèle : d'une part, « quelle est la répartition entre les différents processus hydrologiques ? », d'autre part, « quelle est la hauteur de ruissellement maximum atteinte ? », « où ? » et « dans quelles proportions le bassin versant modélisé a été inondé ? ».

Il est alors possible de comparer ces observations pour différents scénarios comportant plus ou moins de cellules transformées en revêtements perméables et d'évaluer la pertinence des règles utilisées pour la proportion et la localisation de ces revêtements.

4.1.4 DÉTAILS DU MODÈLE *POROUSCITY*

Cette dernière sous-section de présentation du modèle entre dans le détail de sa construction et de son utilisation. Les règles d'initialisation du modèle (4.1.4.1) et les données d'entrée utilisées (4.1.4.2) sont présentées avant de détailler les procédures clefs du modèle (4.1.4.3). Les concepts de ces procédures qui modélisent les processus hydrologiques ont déjà été présentés précédemment, cette sous-section en détaille le code et la construction.

4.1.4.1 INITIALISATION

a. Initialisation du bassin versant

La première initialisation correspond à la commande *SETUP*. Il s'agit d'initialiser le bassin versant étudié. Pour cela l'utilisateur doit importer des données d'altitude (MNT), d'occupation du sol et de localisation des avaloirs. Il doit ensuite définir les variables globales du modèle (4.1.2.2).

Dans le cadre de ce travail, les données de description du bassin versant correspondant au quartier *Riva Bella*, présentées dans la section 2.3, sont utilisées.

L'étape de génération des structures à revêtements perméables peut être conduite, en une seule ou en plusieurs fois, lors de cette première partie de l'initialisation en répétant autant de fois que souhaité une commande dédiée, *SETUP_PP*.

Cette commande permet à l'utilisateur de construire et tester différents scénarios d'implantation. Les scénarios testés dans le cadre de ce travail sont présentés dans la section 4.3.

b. Initialisation de la simulation

Une fois le bassin versant caractérisé, la seconde partie de l'initialisation correspond à la commande *STARTUP*. Elle consiste à mettre (remettre) à zéro toutes les valeurs des indicateurs et les valeurs des attributs de sortie de chaque cellule (attributs enregistrant le volume total par processus hydrologique ou le volume stocké dans chaque réservoir). Ce parti-pris revient à dire qu'au début de la simulation les réservoirs d'interception, et de stockages des cellules sont vides (secs).

Cette procédure d'initialisation ajuste ensuite la valeur des variables *PET* et *Rain*, en fonction du choix par l'utilisateur de la saison et de l'événement pluviométrique.

Enfin, la procédure l'initialisation donne la valeur 'False' à la variable *End?* qui permet de contrôler l'arrêt automatique de la simulation. Cette variable devient 'True' à la fin de l'événement pluvieux modélisé.

4.1.4.2 DONNÉES D'ENTRÉE

L'appellation « données d'entrée » est utilisée ici pour désigner les données qui caractérisent le bassin versant (altitude, occupation du sol, sol) et les données climatiques. Ces données sont renseignées *via* des variables globales qui sont ensuite appliquées aux attributs des cellules. L'appellation « données d'entrée » n'inclut pas les règles de génération des revêtements perméables ni celles de génération des agents. La Figure 4.13 schématise ces données par catégories. Cette sous-section détaille chaque catégorie et précise la source des données utilisées.

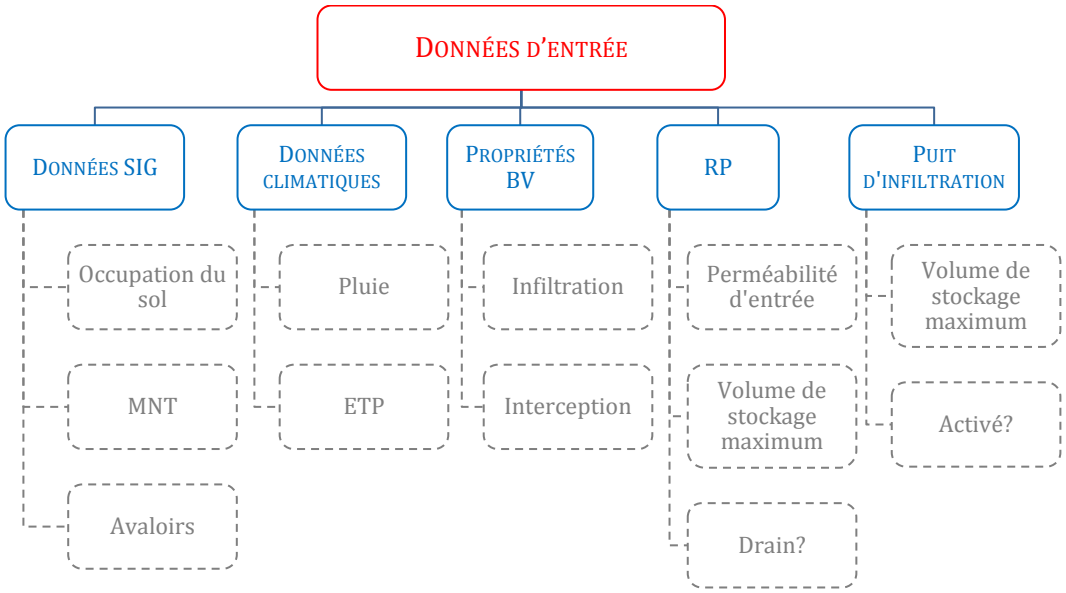


Figure 4.13 - Schématisation des données d'entrée du modèle *PorousCity*

a. Données SIG

Les données SIG doivent être collectées et préparées en amont. Elles sont importées dans le modèle au format raster. Netlogo les applique ensuite aux cellules du domaine de résolution. Il n'y a pas de taille limite du bassin versant qui peut être modélisé dans *PorousCity*. En fonction de la taille du bassin versant et de la taille d'un pixel des fichiers de raster importés l'utilisateur doit ajuster la taille du domaine de modélisation (« world ») dans la fenêtre d'édition dédiée de Netlogo. À noter que lors de l'importation des données d'altitude, ces dernières sont converties en mm et que l'altitude des cellules de type 'edge', et 'building' est artificiellement augmentée.

Dans le cadre de ce travail, les données SIG représentent un sous bassin versant sur Ouistreham, la collecte et la présentation des données utilisées est donnée dans la section 2.3. Deux jeux de données sont utilisés. Le premier, jeu de données de référence par la suite, couvre toute la zone avec une description de l'occupation du sol réalisée à partir de photographie aérienne, et une description de la topographie d'après le MNT Litto3D. Le second jeu de données couvre une partie du bassin versant précédent, zoomée autour de l'avenue de Verdun, avec une description de l'occupation du sol réalisée par repérage visuel sur le terrain. Par la suite, ces deux jeux de données sont désignés respectivement comme, la configuration *Riva Bella* et la configuration *Verdun*.

Les données d'occupation du sol du SIG importées dans le modèle représentent l'occupation du sol en terme d'usage. L'occupation du sol en terme de type revêtement (Figure 4.9) est obtenue

en associant à chacun de ces usages, un type de matériaux de surface entre : bitume, sol compacté, sol enherbé (végétation) et sable. Le deuxième jeu de données, configuration *Verdun*, ajoute un nouveau type d'occupation du sol, le mélange gravier-sable compacté, qui se retrouve sur les trottoirs de l'avenue de Verdun (Figure 4.14). La cartographie et le détail des choix de matériaux de surface sont détaillés dans la section 2.3.

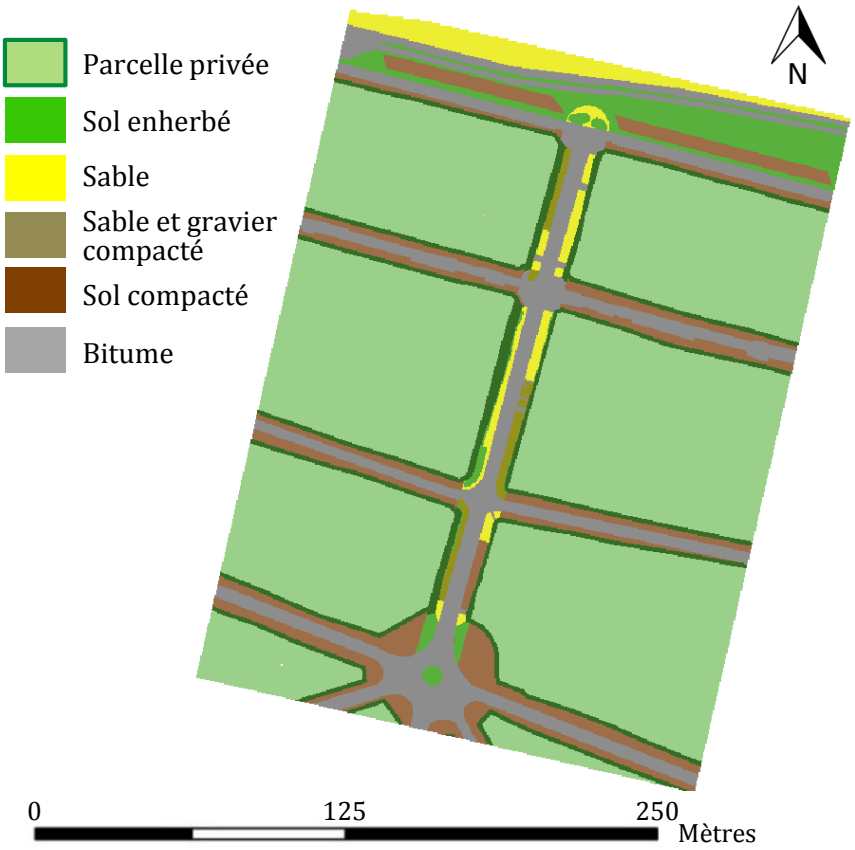


Figure 4.14 – Cartographie du type d'occupation du sol pour la configuration dite *Verdun* qui couvre une partie du bassin versant, zoomé autour de l'avenue de Verdun.

La configuration *Verdun* est utilisée dans la suite de ce chapitre (Section 4.3) pour explorer l'influence de la finesse de description de l'occupation du sol sur les résultats de la modélisation.

b. Données climatiques

Les données climatiques influencent les deux variables globales *Rain* et *PET* qui commandent à chaque pas de temps le flux (en mm) d'eau entrant ou sortant (dans la limite du stock d'eau disponible) de chaque cellule. Le modèle permet d'importer ou de coder des chroniques de pluie ou de valeur d'ETP pour faire varier automatiquement ces valeurs. L'utilisateur peut également les faire varier manuellement.

Dans le cadre de ce travail les données utilisées correspondent : pour la pluie aux événements pluviométriques définis et présentés dans la section 2.4, pour l'ETP à une valeur fixe pour la période d'hiver (1 mm/jour) ou d'été (4 mm/jour), définies à partir des données de l'annexe D.

À noter que la même valeur d'ETP est appliquée indifféremment aux différents types de surface. Comme les données utilisées correspondent à l'ETP pour 1 m^2 de sol enherbé, ce choix conduit probablement à une surestimation de l'évaporation pour les surfaces sans végétation.

c. Propriétés du Bassin Versant

Ces propriétés caractérisent les valeurs de perméabilité du sol et d'interception de surface du bassin versant.

La perméabilité du sol est considérée homogène sur tout le bassin versant dans le cadre de ce travail. Elle correspond à la perméabilité de la dune, avec K_s estimée entre $1{\cdot}10^{-4}$ et $1{\cdot}10^{-5}$ m/s (Section 2.3). La valeur de K_s de référence est fixée à $1{\cdot}10^{-5}$ m/s pour la suite.

Cette valeur de perméabilité est ensuite appliquée à l'attribut *p_permeability* de chaque cellule avec trois exceptions :

- les cellules du type 'bitume' : perméabilité $= 0$ m/s ;
- les cellules de type 'sol compacté' : perméabilité $= K_s/50$ m/s ;
- les cellules de type 'graviers et sables compactés' : perméabilité $= K_s/10$ m/s.

La valeur d'interception est définie pour chaque type de matériaux de surface utilisé : sable, végétation, sol compacté et bitume. Les valeurs utilisées dans le cadre de ce travail sont estimées à partir de la littérature (Chocat, 1978; Krebs et al., 2014; Ragab et al., 2003; Ramier et al., 2011; Salvadore et al., 2015). Une analyse de sensibilité a porté sur l'influence de cette valeur sur le modèle (4.3), le Tableau 4.8 présente les valeurs retenues après cette analyse.

Tableau 4.8 – Valeurs des coefficients d'interception utilisés pour les différents types d'occupation du sol.

	Valeur fixe	**Coefficient 'a'**	**Coefficient 'b'**
	mm	*mm*	*mm*
Sable	10	6	4
Végétation	15	10	5
Graviers compactés	5	2	3
Bitume	2,5	0,5	2

d. Propriétés des structures à revêtements perméables et des puits d'infiltration

Les ouvrages, structures à revêtements perméables et puits d'infiltration sont décrits comme un (ou deux) réservoir(s) avec des règles pour le flux d'entrée, le(s) flux de sortie et le stockage maximum (4.1.3.1.c et 4.1.3.1.d). La valeur de perméabilité de surface, *P_Flow_in*, permet d'imposer une limite au flux d'entrée du réservoir de rétention des structures perméables. Cette valeur est considérée égale à $1{\cdot}10^{-3}$ m/s sans colmatage et à $1{\cdot}10^{-4}$ m/s avec colmatage (Section 2.1 et Annexe B).

Concernant les règles de stockage, trois attributs sont utilisés :

- *P_interception* : contrairement à l'attribut *P_interception* des autres types de revêtements de sol, cette variable n'est pas utilisée ici pour définir le volume d'interception maximum au-dessus de la cellule, mais pour définir le volume maximum de stockage par rétention dans les couches de surface et de lit de pose des revêtements perméables. Ce volume sert de critère pour permettre l'écoulement de l'eau vers la fondation de la structure (réservoir de stockage) ;
- *P_storage* : correspond au volume maximum qui peut être stocké dans la couche de fondation. Cette valeur est un paramètre de conception, elle permet de rendre compte de l'épaisseur de la couche de fondation et de la position du drain, par défaut elle est prise égale à 40 litres (soit une lame d'eau de 40 mm stockée, ce qui revient à dire que le bas

du drain est situé à 10 cm du fond de la structure, avec une porosité des graviers qui composent la couche de fondation de 40 %) ;

- *P_well_storage* : correspond au volume maximum de stockage d'un puits d'infiltration. Ce volume de stockage est défini à 1000 litres conformément aux données locales (Chapitre 2, Section 6). À noter que le fichier importé pour localiser les puits d'infiltration représente les avaloirs et non les puits d'infiltration. Dans la réalité, un puits draine en moyenne quatre avaloirs, or, dans le modèle chaque avaloir fonctionne indépendamment. Pour tenir compte de ce décalage entre réalité et représentation, la valeur de stockage maximum définie pour un avaloir est égale au volume de stockage pour un puits, *P_well_storage*, divisée par 4.

Enfin, deux interrupteurs sont utilisés :

- pour les RP, la variable *Drain?* permet d'activer ou de désactiver la présence d'un drain dans les structures perméables. En l'absence d'un drain, le volume d'eau en surplus (une fois le volume maximum de stockage atteint) est considéré comme excédant les capacités de stockage et donc reste en surface de la structure sous la forme d'une lame d'eau de ruissellement (il convient donc de bien ajuster la valeur de la variable globale *PP_max_storage* en cas d'absence du drain) ;
- Pour les puits, la variable *Well?* permet d'activer ou non la présence des avaloirs.

4.1.4.3 SOUS-MODÈLES

Cette dernière sous-section de la présentation du modèle détaille chacune des procédures de modélisation des processus hydrologiques pour rendre le code implémenté complètement transparent et détaillé. En effet, certains détails de l'implémentation, comme l'ordre de résolution des procédures, peuvent influencer de façon significative les résultats du modèle.

a. Procédure run_permeable_pavement

Cette procédure ne concerne que les cellules de type revêtement perméable. Elle vise à représenter les flux d'eau sortant du réservoir de stockage des structures perméables par infiltration et drainage (voir débordement). Elle se décompose en deux étapes.

1. **Infiltration de l'eau de la structure vers le sol**.
    - Déduit du *storage* la quantité infiltrée *p_infiltration*.
    - Met à jour les attributs *infiltration* et *storage* de la cellule

```
ask patches with [pground = "permeable_pavement" and pp_storage > 0]
[
 ifelse pp_storage > p_infiltration
 [ ;; if
  set pp_infiltration pp_infiltration + p_infiltration
  set pp_storage pp_storage - p_infiltration
 ]
 [ ;; else
  set pp_infiltration pp_infiltration + pp_storage
  set pp_storage 0
 ]
]
```

2. **Drainage ou débordement du stockage en excès**. Si le volume stocké après infiltration dépasse le volume de stockage maximum, le volume en excès est évacué par le drain ou est considéré comme débordant de la structure et est converti en ruissellement.
    - Met à jour la valeur de *storage* égale au stockage maximum et ajoute à l'attribut *pp_drain* ou *runoff* (en l'absence d'un drain) le volume en excès.

    L'attribut *pp_cat* de chaque cellule est ensuite mis à jour en fonction des valeurs d'infiltration, drainage, évaporation et interception.

Note : en cas d'absence de drain, il revient à l'utilisateur d'adapter la valeur du volume de stockage maximum pour que cette valeur corresponde au volume total de la structure ou au volume total admis avant défaillance de l'ouvrage.

b. Procédure run_storage

Cette procédure ne concerne que les cellules de type revêtement perméable. Elle vise à représenter la diffusion de l'eau dans les structures perméables. Elle répond à deux enjeux, d'une part le transfert de l'eau du réservoir de rétention vers celui de stockage, d'autre par la diffusion de l'eau d'une cellule vers une autre.

En effet, une structure perméable va être représentée dans le modèle par plusieurs cellules (par exemple, une place perméable de 5 mètres par 2 sera représentée par 10 cellules). Or, les entités « cellules » n'ont pas d'interaction entre elles dans le modèle. Ainsi, pour que l'eau entrée dans une cellule donnée puisse s'écouler vers le reste des cellules composant la structure perméable les agents *waters* sont utilisés selon le même principe que les agents *drops* en surface.

1. **Génération des agents *waters*.** Si le volume de rétention est supérieur au volume de rétention maximum (*P_interception*), le volume d'eau en excès est converti en agent *waters*.

```
ask patches with [pground = "permeable_pavement" and interception > 0]
[
 if interception > p_interception
 [
  sprout-waters waters_nbr
  [
   set water_size ((interception – (p_interception)) / waters_nbr)
   set color blue - 4
   set size water_size
   set shape "drop"
  ]
  set interception (interception - sum [water_size] of waters-here)
 ]
]
```

2. **Écoulement des agents *waters*.** Par ordre de volume d'eau décroissant, les agents *waters* générés s'écoulent l'un après l'autre en suivant exactement les mêmes règles que pour les agents *drops* dans la procédure *run_runoff*.

```
foreach sort-on [water_size] waters
[
the-drop -> ask the-drop
 [
  let target min-one-of neighbors [pzbottom + sum [water_size] of waters-here + pp_storage]
  if [pzbottom + sum [water_size] of waters-here + pp_storage] of target < (pzbottom + sum [water_size] of
   waters-here + pp_storage)
  [move-to target]
 ]
]
```

3. **Percolation de l'eau de rétention vers la fondation.** En l'absence de pluie, une partie de l'eau retenue par rétention dans le réservoir de rétention s'écoule vers la fondation.

```
  if rain = 0
  [
   if interception > p_interception / 10
   [
    set interception (interception - p_infiltration / 10)
    set pp_storage (pp_storage + p_infiltration / 10)
   ]
  ]
```

4. **Mise à jour des valeurs de stockage**. La valeur de l'attribut *storage* de chaque cellule est mise à jour comme la somme du volume d'eau transporté par les agents *waters* sur la cellule. Les agents sont ensuite supprimés.

En sortie de cette procédure, les cellules RP possèdent donc une valeur de stockage et de rétention mise à jour à partir de l'eau qui s'est écoulée à l'intérieur de la structure. Comme cette procédure intervient après la procédure *run_permeable_pavement*, le volume d'eau contenu dans les agents *waters* n'est converti en stockage qu'après la simulation des processus de drainage et d'infiltration. Concrètement cela revient à considérer que l'eau contenue dans les

agents *waters* met 1 minute à s'écouler dans la couche de fondation ce qui est proche des temps observés au chapitre 3.

c. *Procédure run_surface_process*

Cette procédure permet la modélisation de la majorité des processus hydrologiques. Elle assure la transformation de la pluie en un ruissellement après avoir modélisé les processus de surface correspondant au type de revêtement de la cellule. Cette transformation suit les étapes suivantes.

1. **Pluie :** s'applique sur l'ensemble des cellules actives
    - *Runoff* = *Runoff* + *Rain* (ajoute le volume de pluie au ruissellement déjà présent).

```
ask patches with [pground != "private" and pground != "edge" and pground != "empty"]
[
   set runoff (runoff + rain)
]
```

2. **Interception :** s'applique sur l'ensemble des cellules actives sauf les cellules RP.
    - Déduit du *runoff* l'interception encore disponible *p_interception* – *interception.*
    - Met à jour les attributs *interception* et *runoff* de la cellule.

```
ask patches with [pground != "private" and pground != "edge" and pground != "empty" and pground !=
   "permeable_pavement" and runoff > 0 and interception < p_interception]
[
 ifelse runoff > (p_interception - interception)
 [ ;; if
  set runoff (runoff - (p_interception - interception))
  set interception p_interception
 ]
 [ ;; else
  set interception (interception + runoff)
  set runoff 0
 ]
]
```

3. **Infiltration :** s'applique sur les cellules actives sauf les RP et celles en bitume.
    - Déduit du *runoff* la quantité infiltrée *p_infiltration.*
    - Met à jour les attributs *infiltration* et *runoff* de la cellule.

```
ask patches with [pground != "private" and pground != "edge" and pground != "empty" and pground !=
   "permeable_pavement" and pground != "tarmac" and runoff > 0]
[
 ifelse runoff > p_infiltration
 [ ;; if
  set runoff (runoff - p_infiltration)
  set infiltration (infiltration + p_infiltration)
 ]
 [ ;; else
  set infiltration (infiltration + runoff)
  set runoff 0
 ]
]
```

4. **Entrée de l'eau dans les RP :** s'applique aux cellules de type revêtement perméable.
    - Déduit du *runoff* la quantité entrant dans la structure perméable *p_flow_in*
    - Met à jour la valeur de l'attribut *runoff* et *interception* de la cellule.

```
ask patches with [pground = "permeable_pavement" and runoff > 0]
[
 ifelse runoff > p_flow_in
 [ ;; if
   set runoff (runoff – p_flow_in)
   set interception (interception + p_flow_in)
 ]
 [ ;; else
   set interception (interception + runoff)
   set runoff 0
 ]
]
```

5. **Évacuation de l'eau *via* les avaloirs :** s'applique aux cellules comprenant un avaloir.
    - Évacue l'ensemble du *runoff* vers l'avaloir dans la limite du stockage disponible
    - Met à jour la valeur de l'attribut *runoff* et *well_storage* de la cellule.

```
if well?
[
 ask patches with [pwell = 2]
 [
  ifelse runoff > (p_well_storage - well_storage)
  [ ;; if
   set runoff (runoff - (p_well_storage - well_storage))
   set well_storage p_well_storage
  ]
  [ ;; else
   set well_storage (well_storage + runoff)
   set runoff 0
  ]
 ]
]
```

En sortie de cette procédure, chaque cellule contient donc un certain volume intercepté et ruisselé ; et pour les cellules comprenant un avaloir une valeur de stockage.

d. Procédure run_runoff

Cette procédure simule l'écoulement de l'eau en surface. Ce processus est modélisé en trois temps (plus une étape parallèle) et s'applique à toutes les cellules actives présentant un attribut *runoff* non nul.

1. **Génération des agents *drops*.** La valeur de l'attribut *runoff* de chaque cellule est convertie en un nombre d'agents *drops* définis par la variable globale *drops_nbr*. Comme pour la génération des agents *waters* vue précédemment, chaque agent reçoit une valeur d'attribut *drop_size* correspondant : *drop_size = quantité d'eau ruisselée / drops_nbr*.
   La valeur de l'attribut *runoff* est ensuite mise à jour.
2. **Déplacement des agents *drops*.** Les agents *drops* se déplacent par ordre décroissant de taille vers la cellule adjacente présentant le plus bas niveau piézométrique inférieur à celui de sa propre cellule. La procédure suit le même code que celui des agents *waters.*

Attention, la procédure est suivi par un agent entièrement avantde passer au suivant. L'odre de mouvement de chaque agent impcte donc le résultat finale ce qui explique la très légère part aléatoire dans la résolution du modèle.

3. **Mise à jour de la valeur de ruissellement des cellules actives**. La valeur de l'attribut *runoff* de chaque cellule est mise à jour comme la somme du volume d'eau transportée par les agents *drops* sur la cellule. Les agents sont ensuite supprimés.
   L'attribut *runoff_cat* de chaque cellule est ensuite mis à jour en fonction de la nouvelle valeur de ruissellement.

```
ask patches with [any? drops-here]
[
 set runoff (runoff + sum [drop_size] of drops-here)
 ask drops-here [die]
]
```

4. **Mise à jour de l'écoulement hors du bassin versant**. Le MNT utilisé précise la valeur d'altitude pour les cellules proches de la frontière du bassin versant[25]. Même si ces cellules ne sont pas prises en compte dans la modélisation des processus hydrologiques (elles ne reçoivent pas de pluie) il est possible pour l'eau de ruissellement de s'écouler vers ces cellules. Cela revient physiquement à ce que l'eau ruisselle hors du bassin versant. Ce phénomène, qui reste limité, est permis pour éviter d'avoir un mur virtuel sur les bords du bassin versant.

   Concrètement le modèle additionne le volume d'eau transporté par les agents *drops* qui se retrouvent hors du bassin versant, il met à jour la variable globale de sortie *total_outflow* qui compte le volume ruisselé hors du bassin versant et ensuite supprime les agents *drops* concernés.

En sortie de cette procédure la lame d'eau de ruissellement présente sur les cellules a pu s'écouler de façon gravitaire à une vitesse unique de 1 m/min. Chaque cellule a une valeur de ruissellement mise à jour suite à cet écoulement et tous les agents *drops* créés ont été supprimés.

e. Procédure run_well

Cette procédure ne concerne que les cellules qui contiennent un avaloir. Elle vise à représenter l'équation réservoir des puits d'infiltration avec la mise à jour du stockage en fonction du flux infiltré. Deux hypothèses sont prises : l'infiltration se produit seulement *via* les parois latérales du puits en raison du colmatage du fond, et la porosité des graviers qui composent le puits est égale à 50 %.

Le flux infiltré est calculé à partir de la valeur de perméabilité du sol et de la hauteur d'eau dans l'ouvrage $\left(h = \frac{well\_storage\ (mm)}{1000 \cdot 0{,}5}\right)$ suivant l'Équation 4.6.

Équation 4.6 – Infiltration *via* les puits

$$Q_{infiltré} = 2 \cdot K_s \cdot (1 + h/2) \cdot h \cdot \pi \cdot r$$

Avec $Q_{infiltré}$ et K_s en mm/min et h en mètre. Le rayon du puits, *r*, est pris égal à 1 mètre.

[25] En cas d'absence de valeur une valeur d'altitude est définie en prenant la moyenne des altitudes des cellules adjacentes.

La modélisation de l'infiltration est implémentée de la même façon que précédemment pour la surface ou les RP : déduction du *storage* la quantité infiltrée $Q_{infiltré}$ calculée à partir de la valeur au temps *t* du stockage, puis mise à jour des attributs *infiltration* et *storage* de la cellule.

Contrairement aux revêtements perméables, aucun débordement ne peut se produire ici puisque le volume entrant dans la structure est limité par le volume disponible.

f. Procédure run_evaporation

Cette dernière procédure concerne toutes les cellules actives. L'évaporation est modélisée sur le même principe que l'infiltration comme un flux sortant d'un volume de stockage, le volume en question correspondant ici à interception.

- Déduit de l'*interception* la quantité *PET* évaporée.
- Met à jour les valeurs des attributs *evaporation* et *interception* de la cellule.

```
ask patches with [pground != "private" and pground != "edge" and pground != "empty" and interception > 0]
[
 ifelse interception > PET
 [ ;; if
  set evaporation evaporation + PET
  set interception interception - PET
 ]
 [ ;; else
  set evaporation evaporation + interception
  set interception 0
 ]
]
```

En sortie de cette procédure le niveau d'interception est mis à jour pour tenir compte de l'évaporation réalisée. Si un ruissellement est encore présent sur la cellule, il sera tout ou en partie transféré vers le réservoir d'interception au pas de temps suivant lors de la procédure *run_surface_processes*. En évacuant l'eau interceptée, la procédure *run_evaporation* contribue donc bien à évaporer l'eau ruisselée.

SECTION 4.2

4.2 CALAGE ET VÉRIFICATION DU MODÈLE *POROUSCITY*

Cette section présente les résultats de simulations réalisées dans le but de calibrer des paramètres du modèle *PorousCity* ou de vérifier la cohérence de ces résultats. Elle est organisée en quatre sous-sections :

- Le calage des variables de génération des agents *drops* et *waters* ;
- la vérification de la pertinence de la modélisation des structures à revêtements perméables ;
- l'analyse de l'influence des choix et des valeurs données aux variables de description du bassin versant ;
- enfin, une vérification de la cohérence entre les résultats du modèle et les observations de terrain.

4.2.1 CALAGE DES VARIABLES DE GÉNÉRATION DES AGENTS *DROPS* ET *WATERS*

Les variables *drops_nbr* et *waters_nbr* définissent respectivement le nombre d'agent *drops* et *waters* générés à chaque pas de temps par cellule. En augmentant le nombre d'agents, le volume d'eau transporté par chacun diminue, ce qui contribue à améliorer la finesse de modélisation et donc les résultats obtenus. D'un autre côté, sachant que chacun de ces agents est ensuite appelé à tour de rôle pour modéliser les écoulements, plus le nombre d'agents générés est important, plus le temps de calcul est augmenté.

Il existe donc une relation directe entre la finesse de modélisation et le temps de calcul. Le calibrage des variables *drops_nbr* et *waters_nbr* consiste à faire varier de 1 à 9 la valeur de ces variables et de déterminer le meilleur compromis. De façon plus large, la question posée revient à estimer en combien d'agents un certain volume doit être divisé pour assurer une diffusion réaliste de ce volume par écoulement gravitaire.

4.2.1.1 PROTOCOLE DE CALAGE

Pour la variable *drops_nbr*, puisque ce calage porte seulement sur le ruissellement de surface, aucun revêtement perméable n'est simulé. Les données d'entrée utilisées visent à représenter l'état actuel du bassin versant. Les puits d'infiltration sont simulés sans limite de stockage.

Pour la variable *waters_nbr*, il est nécessaire en revanche de générer des revêtements perméables. Afin que cette génération soit strictement identique d'une simulation à l'autre, elle est réalisée de façon automatique avec les quatre règles de localisation renseignée (Tableau 4.9). La variable *drops_nbr* est fixée à 4 d'après le calage précédente (4.2.1.2).

Tableau 4.9 – Règles de localisation des RP utilisées pour le calage de la variable *waters_nbr*

pp_imp_ratio	*pp_size*	*pp_function_localisation*	*pp_elevation_localisation*
10 %	20 mètres	Parkings imperméables	Bas

Dans les deux cas, les conditions climatiques simulées sont l'événement dit « extrême » du 22 juillet 2013 et une ETP d'été. Le critère de fin de simulation utilisé est une durée maximum de 500 minutes (soit 375 minutes de drainage après la fin de la pluie).

27 simulations sont réalisées dans chaque cas, 3 pour chaque valeur possible des variables *drops_nbr* ou *waters_nbr* variant de 1 à 9. Pour chaque simulation, les indicateurs de sortie (4.1.3.5) sont enregistrés à chaque pas de temps. Le temps de calcul total par simulation est également enregistré.

Pour étudier l'influence des règles de localisation des revêtements perméables sur le calage de la variable *waters_nbr*, des essais complémentaires ont été réalisés avec un ratio *pp_imp_ratio* de 10 % et 20 % et une règle de localisation sur les trottoirs. Ces essais ont seulement porté sur les valeurs *waters_nbr* = 4 et *waters_nbr* = 9.

Pour l'exploitation des résultats, la valeur finale est utilisée pour les indicateurs des processus hydrologiques et la valeur maximum est utilisée pour les indicateurs portant sur le ruissellement. À chaque fois, un écart type est calculé à partir des résultats des trois essais effectués pour chaque valeur des variables testées. Cette répétabilité permet de tenir compte de l'influence de la stochasticité sur les résultats de la modélisation.

4.2.1.2 RÉSULTATS POUR LA VARIABLE *DROPS_NBR*

Les résultats sur le ruissellement sont analysés, d'une part au regard du maximum de ruissellement (Figure 4.15) et d'autre part en fonction du maximum de cellules dans chacune des catégories de ruissellement (Figure 4.16). Ces valeurs sont exprimées respectivement en % du volume total entrant et en % du nombre de cellules actives.

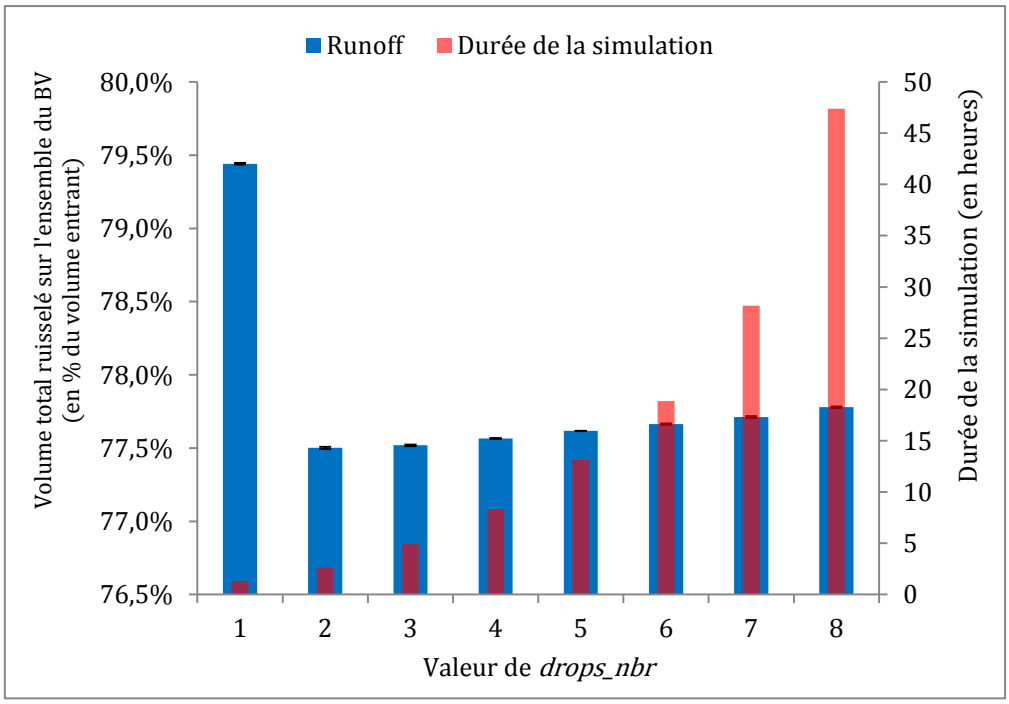


Figure 4.15 – Variation du volume total ruisselé et du temps de simulation en fonction de la valeur de *drops_nbr*

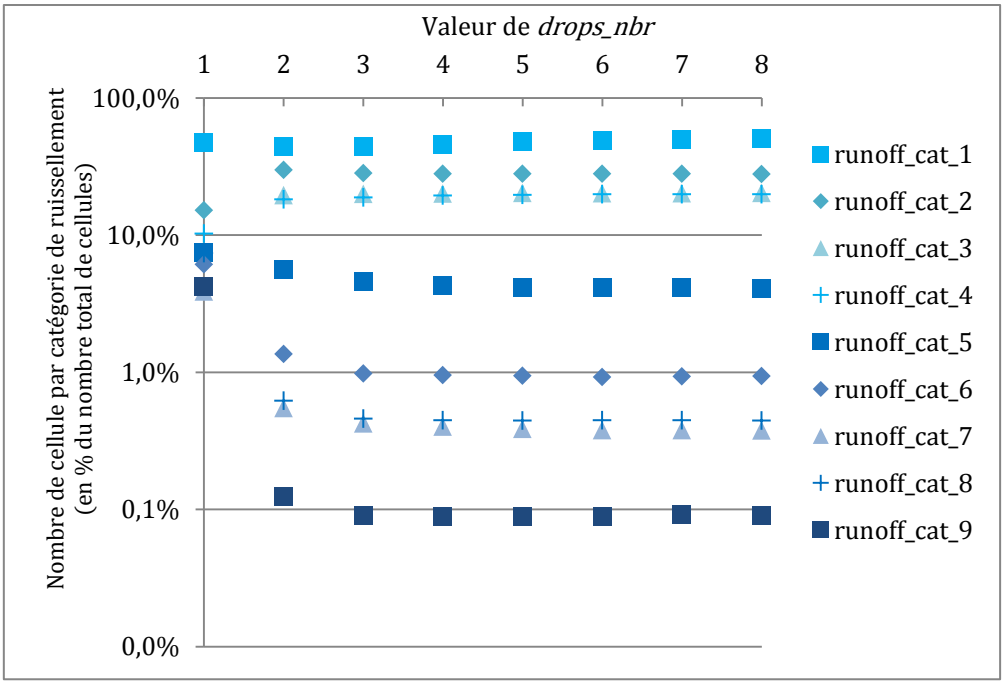


Figure 4.16 – Variation du nombre de cellules par catégorie de ruissellement en fonction de la valeur de *drops_nbr*

Les résultats pour *drops_nbr* = 9 n'ont pas pu être obtenus, le nombre d'agents générés dépassait le nombre maximum modélisable par Netlogo compte tenu de la RAM disponible.

Les résultats de la Figure 4.15 font nettement ressortir le seuil franchi avec le passage de 1 à 2 agents générés par cellule. L'échelle verticale utilisée est cependant à souligner. En effet, toutes les valeurs de ruissellement maximum obtenues sont proches (de 77,5 % à 79,4 % du volume entrant, soit un écart de seulement 2,5 %) ce qui signifie que dans les conditions de la simulation, la variable *drops_nbr* n'a qu'une influence limitée sur le ruissellement. À noter que ces résultats présentent également un très faible écart-type, la part aléatoire du modèle n'a pas d'influence ici.

L'écart notable de résultats entre la génération de 1 à 2 agents est également souligné par la Figure 4.16. Ce graphique, tracé sur une échelle logarithmique, montre que l'augmentation du nombre d'agents générés par cellule entraine une diminution du nombre de cellules avec un ruissellement supérieur à 30 cm (catégories 5 à 9). Le nombre de cellules concernées passe de 29 % du total à 6 % quand *drops_nbr* passe de 1 à 8. Inversement, l'augmentation du nombre d'agents générés s'accompagne d'une augmentation du nombre de cellules avec un ruissellement compris entre 1 et 30 cm (catégories 2 à 4). Le nombre de cellules concernées passe de 33 % à 68 %. Le nombre maximum de cellules dans la catégorie 1 reste quant-à-lui relativement stable, entre 43 % et 50 % du total de cellules actives.

Le seuil de *drops_nbr* = 1 à *drops_nbr* = 2 se retrouve également au niveau des processus hydrologiques (études des volumes totaux en fin de simulation pour chacun des processus). Avec la génération d'un seul agent, les volumes infiltrés par la surface, infiltrés par les puits d'infiltration et ruisselés hors du BV sont fortement minorés au profit du ruissellement.

L'influence du paramètre *drops_nbr* sur les résultats s'explique par la vitesse à laquelle la lame d'eau ruisselée est répartie en surface. Avec un seul agent généré, certaines cellules accumulent un niveau excessif d'eau, ralentissant les différents processus hydrologiques.

Les résultats de la Figure 4.16 montrent qu'une valeur de *drops_nbr* au moins égale à 3 est nécessaire pour ne pas introduire un biais dans les résultats. Au regard de ces résultats, et de la durée de simulation, cette variable est fixée arbitrairement à 4 pour la suite de ce travail.

4.2.1.3 RÉSULTATS POUR LA VARIABLE *WATERS_NBR*

La série d'essais avec 10 % de revêtements perméables localisés sur les parkings imperméables ne montre aucune influence significative de la variable *waters_nbrs* sur les résultats. L'augmentation du nombre d'agent *waters* s'accompagne d'une très légère augmentation du temps de simulation (Figure 4.17).

Compte tenu de la faible influence sur la durée de simulation, la variable *waters_nbr* est également fixée à quatre pour la suite de ce travail.

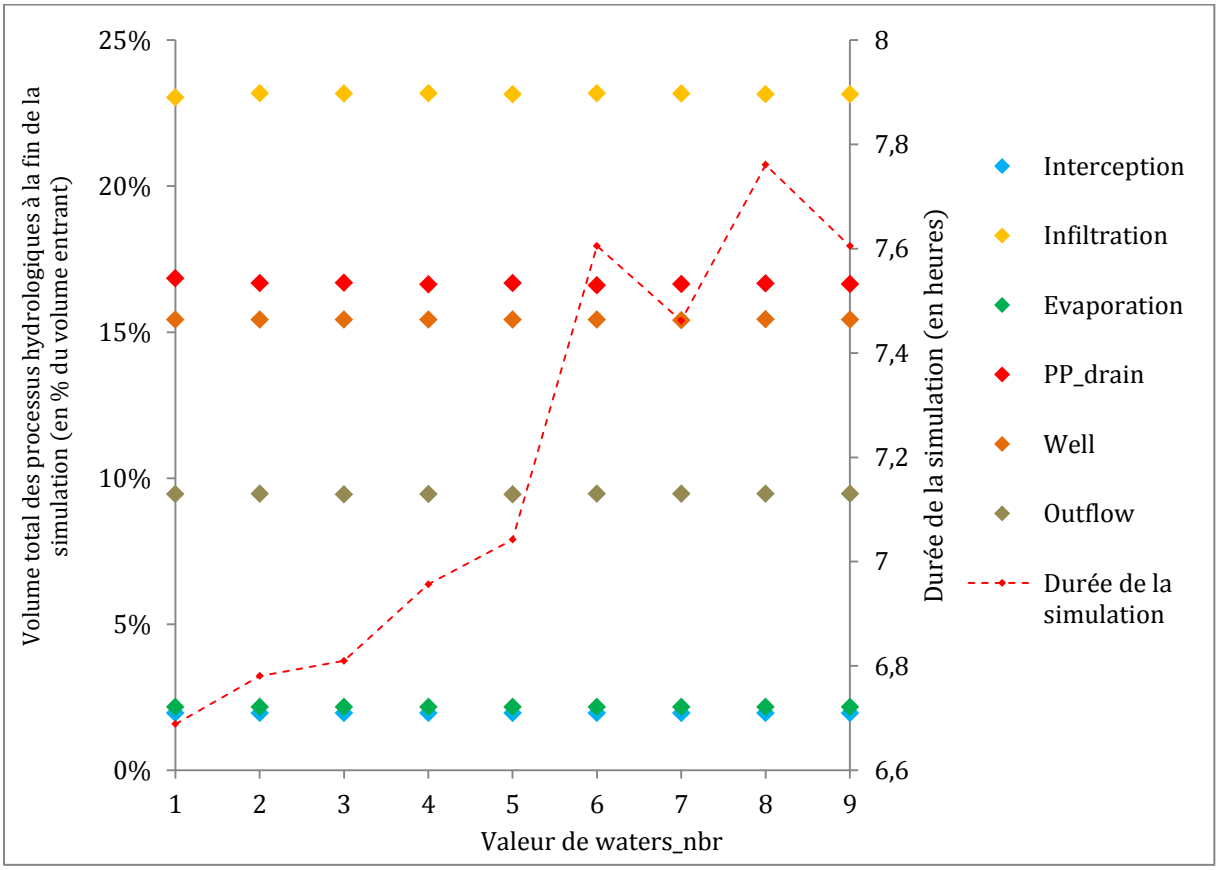


Figure 4.17 – Influence du paramètre *waters_nbr* sur les processus hydrologiques et la durée de la simulation.

La seconde série d'essais avec 10 % et 20 % de revêtements perméables placés sur les trottoirs a été conduite pour valider si ce choix n'influence pas les résultats du modèle dans une autre configuration de proportion et de localisation des revêtements perméables. Les résultats de cette seconde série sont similaires à la première (Figure 4.18).

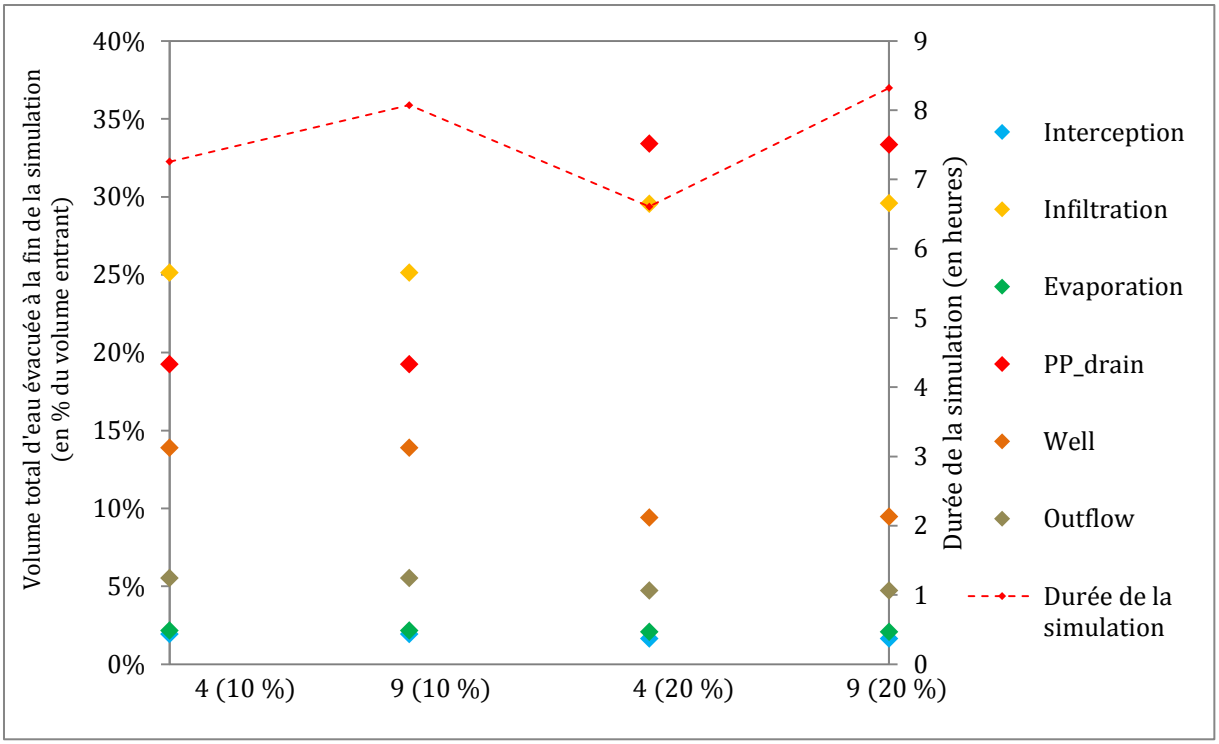


Figure 4.18 - Influence du paramètre *waters_nbr* sur les processus hydrologiques et la durée de la simulation, en fonction du ratio de revêtements perméables implantés.

Ce graphique permet de visualiser l'influence de la proportion de revêtements perméables. Le passage de 10 % à 20 % entraîne logiquement une augmentation du volume drainé et infiltré et une diminution du volume ruisselé à l'extérieur du BV et évacué par les puits d'infiltration. En revanche les résultats ne montrent aucune influence significative de la variable *waters_nbr*. Ils valident donc le calage de *waters_nbr* à 4.

4.2.1.4 INFLUENCE DE L'ORDRE DE RÉSOLUTION ALÉATOIRE DU RUISSELLEMENT

Comme souligné dans la présentation du modèle, la simulation de l'écoulement de l'eau en surface est réalisée agent *drop* par agent *drop*. L'ordre dans lequel les agents *drop* sont appelés impacte la modélisation du ruissellement. Cet ordre dépend de la taille des agents, les agents avec le plus grand volume d'eau bougent en premier, mais il comprend aussi une part aléatoire quand plusieurs agents ont la même taille (ce qui est très courant).

Avant d'exploiter le modèle il convient de quantifier l'influence de ce tirage aléatoire sur les résultats. Dans ce but, les simulations de calage présentées précédemment ont été répétées trois fois. Les résultats présentés sur la Figure 4.15 donnent la valeur moyenne et l'écart type des valeurs obtenues pour chaque simulation. Quelle que soit la valeur de la variable *drops_nbr* l'écart type du volume de ruissellement est compris entre 0,01 et 0,07 % du total de précipitation.

Ces résultats sont approfondis sur la Figure 4.19 pour la valeur *drops_nbr* =4 avec la visualisation des différents processus hydrologiques. Là encore, quel que soit le processus l'écart type reste inférieur à 0,07 % du total de précipitation.

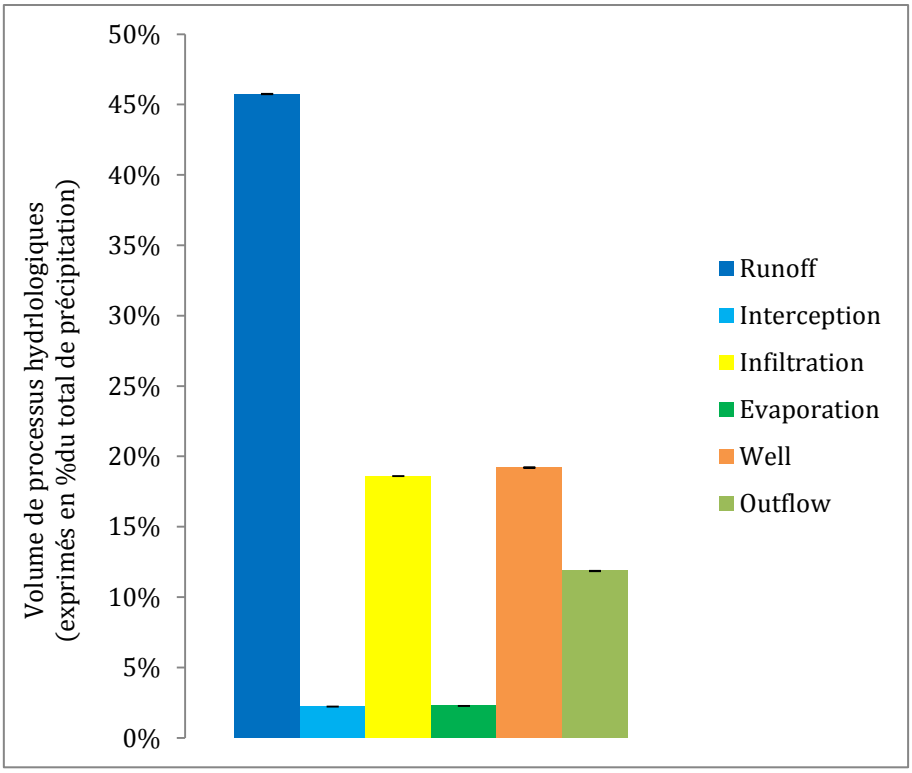


Figure 4.19 – Bilan hydrologique pour la simulation de calage *drops_nbr* = 4, avec visualisation de l'écart type des résultats des processus hydrologiques.

Ces résultats montrent que la part aléatoire dans l'ordre de déplacement des agents *drops* n'a pas d'influence significative sur les résultats du modèle *PorousCity*.

Par la suite, certaines simulations ont été répétées plusieurs fois (trois fois ou cinq fois en fonction des cas), leurs résultats sont alors présentés avec un écart type correspondant aux résultats obtenus. Compte tenu de la très faible influence de l'ordre aléatoire de déplacement des agents sur les résultats du modèle, cette répétition des simulations n'a pas été systématiquement effectuée pour limiter la durée de modélisation.

4.2.2 VÉRIFICATION DE LA MODÉLISATION DES STRUCTURES À REVÊTEMENTS PERMÉABLES

La représentation des structures à revêtements perméables dans le modèle *PorousCity* est basée sur les résultats de l'exploration du modèle *PermetAble*. Comme présenté précédemment (4.1.3.1), cette modélisation repose sur un modèle conceptuel avec deux réservoirs. Cette représentation nécessite trois variables : la perméabilité d'entrée (*PP_flow_in*), le volume de stockage par rétention maximum (*PP_interception*) et le volume de stockage maximum dans la fondation (*PP_max_storage*).

Cette sous-section compare les résultats de cette modélisation des revêtements perméables par le modèle *PorousCity* à ceux obtenus avec le modèle *PermetAble*. Cette comparaison permet de vérifier la valeur utilisée pour la variable *PP_interception* (10 mm) et la validité de la simulation des processus hydrologiques des revêtements perméables par le modèle *PorousCity*.

4.2.2.1 CONFIGURATION DES ESSAIS DE COMPARAISON ENTRE *PERMETABLE* ET *POROUSCITY*

Pour ce travail de comparaison, la configuration utilisée pour les scénarios d'exploration du modèle *PermetAble* est reproduite dans *PorousCity*, à savoir :

- une structure perméable de 2 mètres de large avec une surface contributrice de type 'bitumé' (coefficient de ruissellement de 80 %) à gauche et à droite de 5 mètres de large ;
- un drain situé à 20 cm du fond de la structure, soit un réservoir *PP_max_storage* de 80 litres par m² (avec une porosité de la couche de fondation de 40 %) ;
- un sol support en limon avec une perméabilité de 5.10^{-6} m/s, soit 0,3 mm/min ;
- une évaporation de 2 mm/jour, soit $1,4.10^{-3}$ mm/min.

La Figure 4.20 présente le domaine de modélisation dans *PorousCity*. Une pente transversale de 2 % et une longueur de 10 mètres sont utilisées ici.

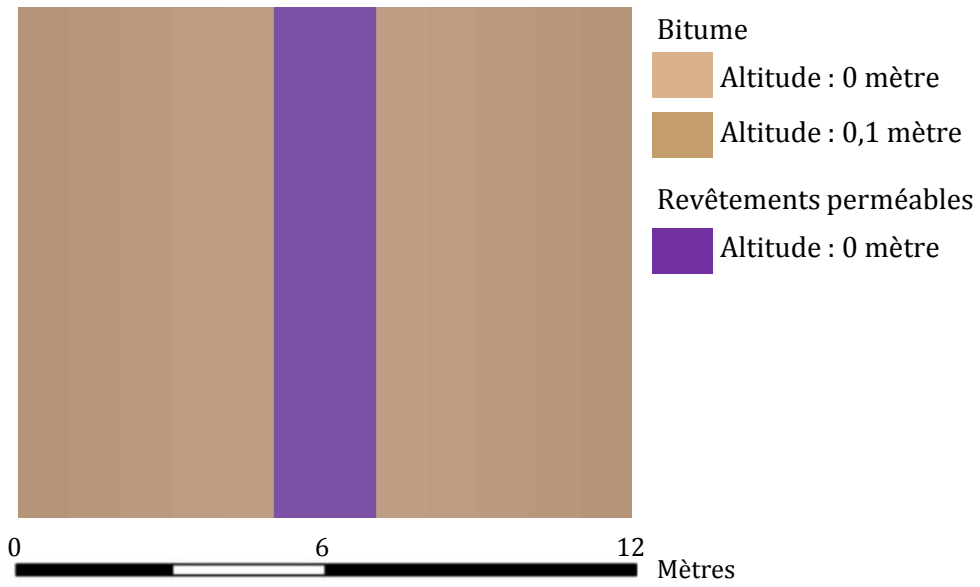


Figure 4.20 - Représentation de la configuration du scénario de référence de la modélisation avec *PermetAble* dans le modèle *PorousCity*.

Les sept événements représentatifs des différentes catégories de pluie sont simulés pour vérifier la représentation des processus pour les différentes conditions pluviométriques qui sont utilisées par la suite.

4.2.2.2 COMPARAISON DES RÉSULTATS ENTRE *PERMETABLE* ET *POROUSCITY*

La vérification des résultats donnés par le modèle *PorousCity* a été réalisée en deux temps. Dans un premier temps le volume total entrant dans la structure perméable et le volume maximum de stockage dans la fondation ont servi d'indicateurs pour ajuster les paramètres de la modélisation. Dans un second temps, ces paramètres ajustés ont été utilisés pour simuler les sept événements pluvieux et comparer les résultats obtenus avec ceux du modèle *PermetAble*.

a. Ajustement des paramètres de simulation

Pour comparer les bilans hydrologiques calculés par les deux modèles il faut que le volume entrant dans la structure soit le même. Or le ruissellement est déterminé de façon différente dans les deux modèles. Dans *PermetAble* il s'agit d'une valeur calculée à partir d'un coefficient

de ruissellement (Équation 2.11). Dans *PorousCity*, chaque cellule produit une lame d'eau de ruissellement en fonction notamment de son réservoir d'interception.

En modélisant les deux zones contributrices comme un revêtement de type 'bitumé' avec un réservoir d'interception de 2,5 mm, le ruissellement produit par les cellules dans *PorousCity* est supérieur au ruissellement calculé dans *PermetAble* avec un coefficient de ruissellement de 0,8. Pour obtenir le même ruissellement il faut modifier, dans *PorousCity*, la valeur d'interception, voire rajouter un peu d'infiltration. Mais un tel ajustement ne serait valable que pour une pluie donnée. Pour éviter l'existence d'un écart entre les volumes entrants des deux modèles, la modélisation dans *PorousCity* a été modifiée. Les cellules des deux zones contributrices sont représentées comme n'ayant aucune interception, mais elles reçoivent seulement 80 % de la pluie, ce qui permet d'obtenir un ruissellement similaire à celui de *PermetAble*.

En dehors d'un aspect purement pratique de comparaison des deux modèles, la question du calcul du ruissellement abordée ici souligne la différence d'approche et de résultat entre une représentation spatialisé (*PorousCity*) et globale (*PermetAble*). Dans le second cas, il semble difficile d'obtenir une estimation simple du ruissellement qui soit valable pour différents régimes de pluie.

Le deuxième critère utilisé pour ajuster les paramètres du modèle concerne le volume de stockage dans la fondation. Dans *PermetAble* le volume stocké est calculé en intégrant la valeur de teneur en eau sur l'ensemble de la fondation. Dans *PorousCity* il s'agit d'une valeur globale, *pp_*storage, qui est limitée par la valeur de stockage maximum.

Or, les résultats du modèle *PermetAble* ont montré que le stockage dans la couche de fondation pour l'événement de référence atteint 201 litres pour une structure de 2 m^2, soit environ 100 litres pour 1 m^2 de structure (Chapitre 3). En limitant le stockage à 80 litres comme cela a été calculé initialement pour représenter un drain situé à 20 cm du fond de la structure, la modélisation *PorousCity* sous-estime le volume stocké dans la fondation. Pour corriger cet écart la variable *pp_max_storage* a été fixée à 100 litres et non à 80 litres par m^2.

À nouveau cette différence entre les deux modèles relève de l'écart entre une approche spatialisée (*PermetAble*) et une approche globale (*PorousCity*). Dans *PermetAble* le stockage a lieu au fond de la structure (sous le drain) mais aussi un peu au-dessus du niveau du drain par rétention (Chapitre 3). L'utilisation d'une valeur globale dans *PorousCity* ne permet pas de représenter une telle dynamique.

b. Comparaison des bilans hydrologiques pour chaque événement pluvieux

La Figure 4.21 présente le bilan hydrologique simulé avec le modèle *PorousCity* pour chacun des événements pluvieux. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus avec le modèle *PermetAble* sur la Figure 4.22 qui donne les écarts entre les deux simulations.

À noter que sur ces figures les valeurs *Interception_max* et *Storage_max* donnent la hauteur de stockage maximum atteinte, respectivement, dans le réservoir de stockage par rétention (correspondant au volume *V_pave_max* et *V_lit_max* du modèle *PermetAble*) et dans le réservoir de stockage à saturation (correspondant au volume *V_Fond_max*).

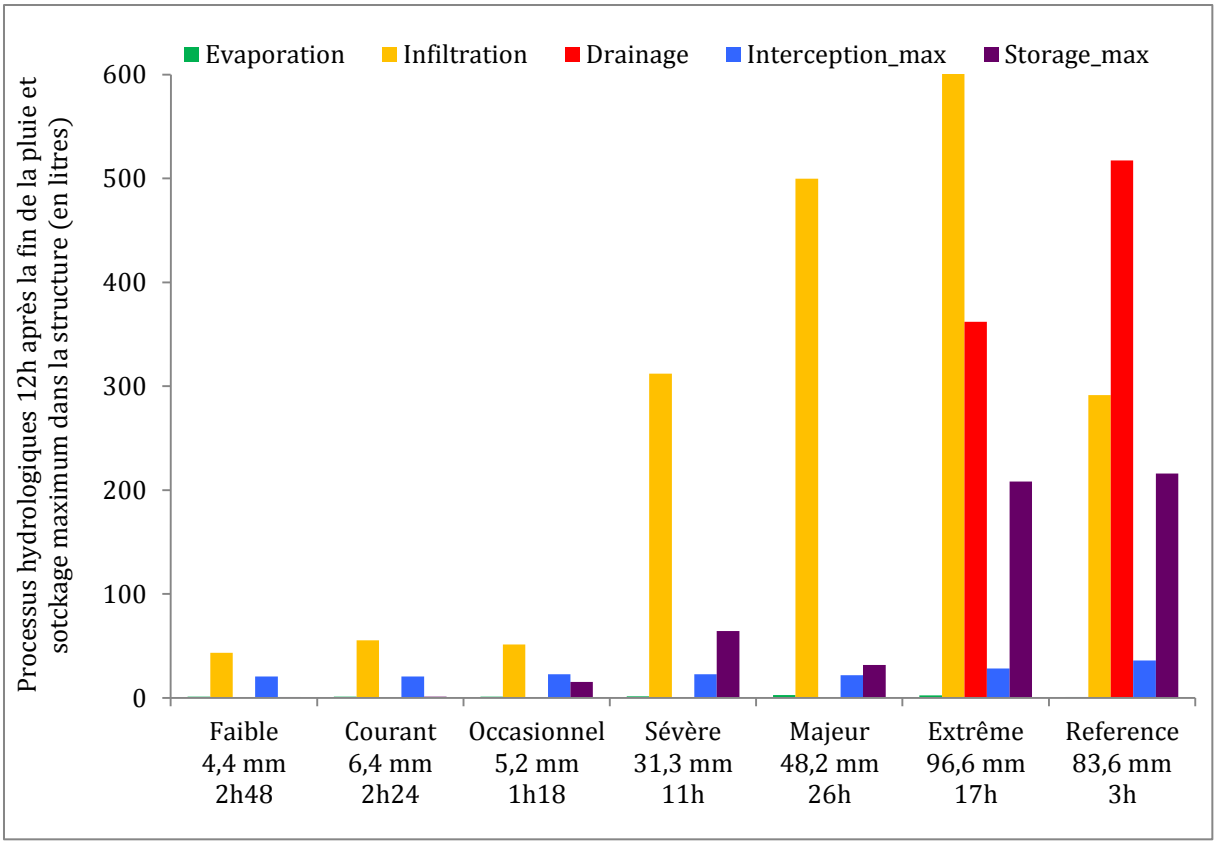


Figure 4.21 – Bilan hydrologiques de la simulation de vérification de la modélisation des structures perméables pour chaque événement pluvieux.

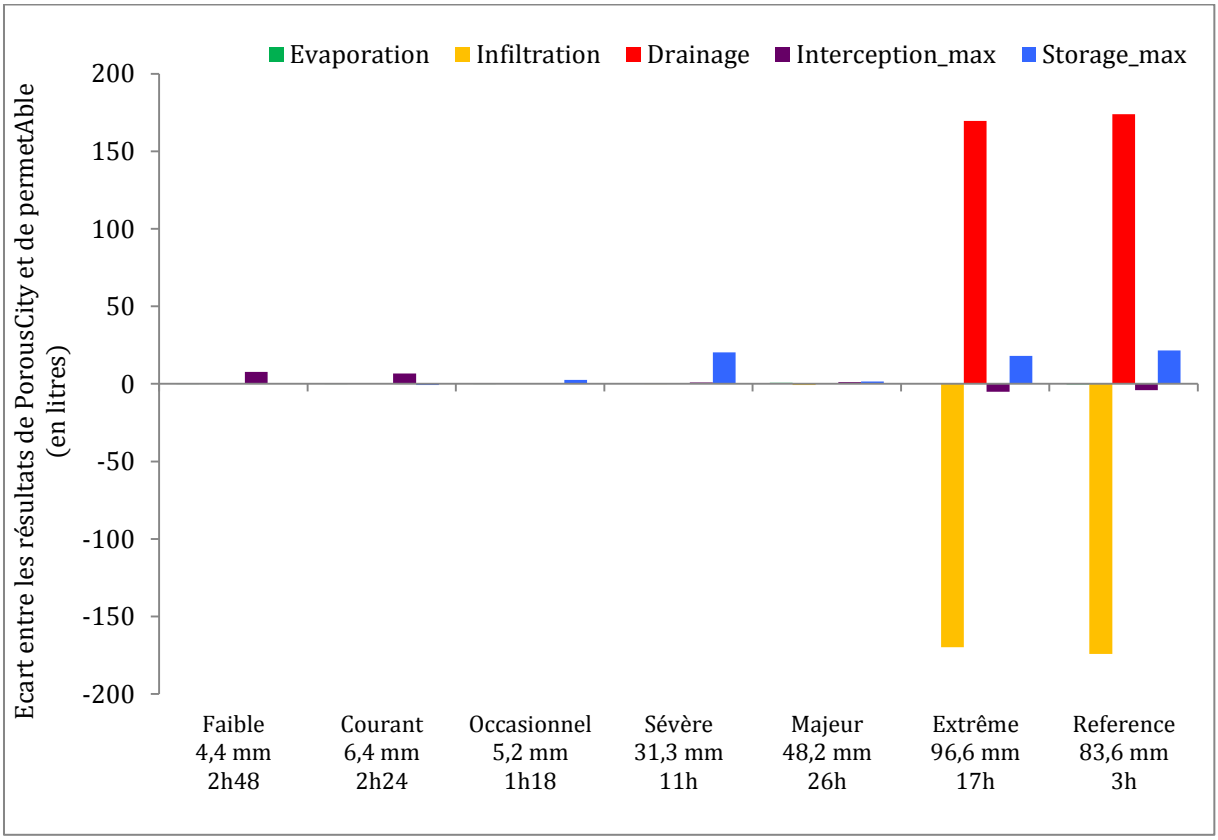


Figure 4.22 – Écarts entre les résultats des modèles *PermetAble* et *PorousCity* pour chaque processus hydrologique et pour chaque événement pluvieux.

La comparaison entre les bilans hydrologiques des deux modèles montre que la modélisation avec *PorousCity* reproduit fidèlement les résultats pour l'ensemble des événements à l'exception de ceux où une évacuation par le drain intervient (les événements de type « extrême »).

Les différences entre les deux modèles sont détaillées ci-dessous processus par processus :

- évaporation : les résultats du modèle *PorousCity* oscillent entre une très légère surestimation ou une très légère sous-estimation. Les écarts sont compris entre +0,74 litre pour l'événement majeur et -0,36 litre pour l'événement de référence. Compte tenu de l'incertitude importante sur l'estimation de l'évaporation dans les deux modèles cet écart n'est pas significatif ;
- infiltration : les simulations des événements faibles à majeurs ne présentent aucun écart significatif d'infiltration (< 0,7 litre). En revanche les deux événements extrêmes présentent des écarts importants, respectivement -184 et -178 litres. Cet écart de vitesse d'infiltration est particulièrement visible sur la Figure 4.23 qui détaille les hydrogrammes de chaque processus dans le cas de l'événement de référence ;
- drainage : le drainage est le processus que le modèle *PorousCity* reproduit le moins bien. Ce modèle le surestime systématiquement par rapport aux résultats du modèle *PermetAble*. Cette surestimation s'explique en raison de la sous-estimation de l'infiltration, détaillée ci-après ;
- stockage maximum en surface (*interception_max*) : le modèle *PorousCity* surestime le volume stocké par rétention dans les couches de surface pour les événements faibles à majeur. Cette surestimation est significative pour les événements dit « faible » et « courant» avec respectivement +7,7 et +6,7 litres. Pour les autres événements l'écart reste inférieur à 1 litre. Pour les événements extrêmes, ce volume est sous-estimé par le modèle *PorousCity*, avec respectivement -5,0 et -4,1 litres.

  Ces écarts s'expliquent en raison de l'utilisation d'un volume de stockage de rétention maximum, fixé à 10 litres quel que soit l'événement pluvieux modélisé. Cette estimation de 10 litres correspond au volume de rétention moyen obtenu lors de l'exploration du modèle *PermetAble* pour l'ensemble des pluies simulées. Il est donc logique que pour un événement faible ce volume soit surestimé et inversement pour un événement extrême.

  Malgré les écarts constatés, ce volume sera conservé à 10 litres pour la suite de ce travail. Dans l'idéal il faudrait ajuster cette valeur en fonction de la pluie modélisée ;
- stockage maximum dans la fondation (*storage_max*) : trois des événements modélisés présentent un écart significatif entre les résultats des deux modèles, l'événement sévère (+22,4 litres), et les deux événements extrêmes (+18,1 et +21,5 litres).

  Comme pour la surestimation du drainage, cette surestimation est due à la sous-estimation de l'infiltration dans *PorousCity* par rapport à *PermetAble*. À noter que pour les événements extrêmes, le volume de stockage maximum simulé est respectivement de 208 et 206 litres, soit au-dessus de la valeur maximum fixée à 200 litres. Ces valeurs sont obtenues ponctuellement (pendant 1 minute) en raison de l'ordre d'exécution des procédures (la procédure *run_permeable_pavement* venant avant *run_storage*).

Pour approfondir la comparaison entre les résultats des deux modèles les hydrogrammes de débit cumulé sont tracés sur la Figure 4.23 pour l'événement de référence. Cette figure permet de comparer la différence de dynamique de modélisation.

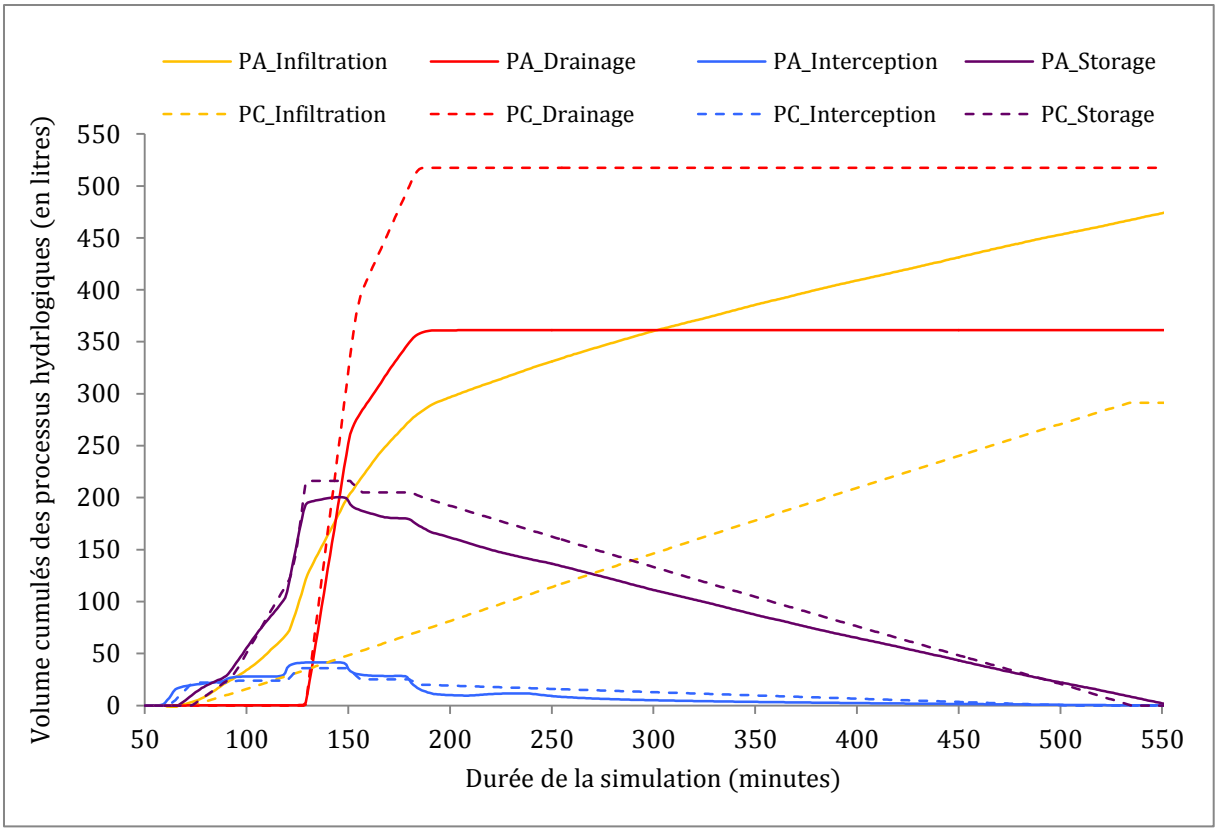


Figure 4.23 – Comparaison des hydrogrammes de débits cumulés des processus hydrologiques modélisés par les modèles *PermetAble* et *PorousCity* pour l'événement de référence.

Les résultats du modèle *PorousCity* reproduisent fidèlement la dynamique obtenue avec *PermetAble*. Cette figure illustre la relativement bonne adéquation entre les résultats des valeurs de stockages dans les deux modèles. Cette visualisation permet de confirmer que la légère surestimation du volume de stockage dans la fondation (*storage*), par le modèle *PorousCity*, intervient au moment du pic de pluie quand le volume stocké dépasse la valeur limite de 100 litres.

Concernant l'écart sur l'infiltration, la visualisation des hydrogrammes montre nettement l'écart entre les deux modélisations. La valeur d'infiltration dans *PermetAble* est plus importante dès le début de la pluie et surtout elle augmente significativement à mesure que le stockage dans la structure augmente. Cette augmentation s'explique par la charge hydraulique plus importante due à la hauteur d'eau stockée. Dans *PorousCity* en revanche la valeur d'infiltration reste constante puisqu'elle dépend seulement de la perméabilité du sol.

Pour tenir compte de la mise en charge de l'eau dans la structure une simulation a été réalisée en modifiant dans *PorousCity* le calcul de l'infiltration (Équation 4.7).

Équation 4.7 – Calcul du débit d'infiltration en fonction de la charge hydraulique

$$Q = K \cdot (1 + h)$$

L'influence de la prise en compte de la hauteur dans le calcul de l'infiltration sur les écarts entre les deux modèles est mise en évidence dans le Tableau 4.10. Sans surprise la modification du calcul de l'infiltration diminue l'écart des résultats entre les deux modèles pour les événements où un stockage significatif a lieu dans la couche de fondation.

Tableau 4.10 – Ecart (en litres) entre le bilan hydrologique de *PorousCity* et de *PermetAble* pour chaque événement pluviométrique en fonction de la règle de calcul de l'infiltration

	Faible 4,4 mm 2h48	Courant 6,4 mm 2h24	Occasionnel 5,2 mm 1h18	Sévère 31,3 mm 11h	Majeur 48,2 mm 26h	Extrême 96,6 mm 17h	Reference 83,6 mm 3h
				Q = Ksol			
Evaporation	0,0	-0,1	-0,1	0,2	0,7	0,3	-0,4
Infiltration	0,0	0,1	0,1	-0,2	-0,7	-184,0	-178,4
Drainage	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	183,7	178,7
Interception_max	7,7	6,7	0,2	0,8	1,1	-5,1	-4,1
Storage_max	0,5	-0,8	2,6	22,4	2,3	18,1	21,5
				*Q = Ksol * (1 + h)*			
Evaporation	0,0	-0,1	-0,1	0,2	0,7	0,3	-0,4
Infiltration	0,0	0,1	0,1	-0,2	-0,7	-149,9	-166,6
Drainage	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	149,6	166,9
Interception_max	7,7	6,7	0,2	0,8	1,1	-5,1	-4,1
Storage_max	0,5	-0,8	2,6	17,2	0,6	18,1	21,5

Cependant, malgré la prise en compte de la hauteur du volume d'eau stockée, l'écart entre la modélisation de l'infiltration dans *PermetAble* et dans *PorousCity* reste significatif. En effet, l'utilisation de l'Équation 4.7 ne conduit pas à une variation aussi forte du débit d'infiltration que celle constatée avec le modèle *PermetAble* (Figure 4.24).

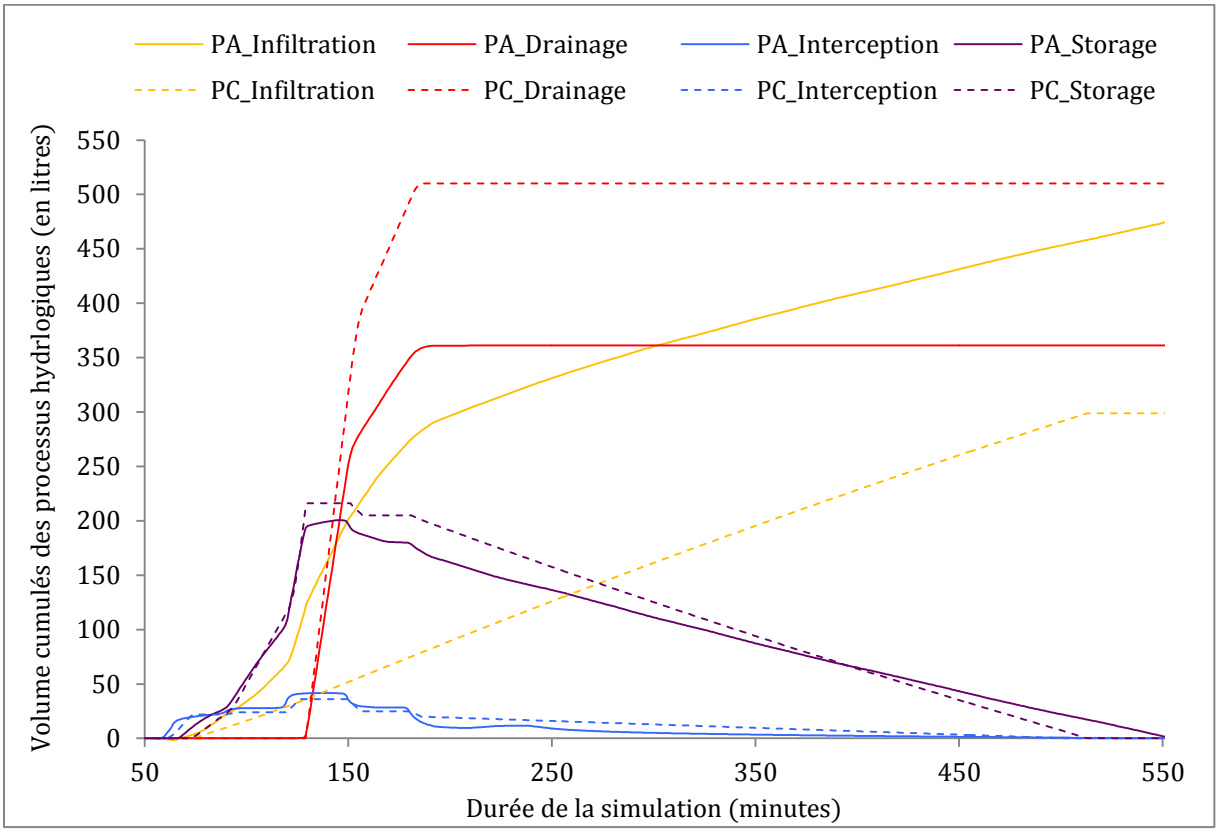


Figure 4.24 - Comparaison des hydrogrammes de débits cumulés des processus hydrologiques modélisés par les modèles *PermetAble* et *PorousCity* pour l'événement de référence. Débit d'infiltration calculé en tenant compte de la charge hydraulique.

La différence de modélisation de l'infiltration entre les deux modèles, qui persiste malgré la prise en compte de la hauteur d'eau stockée dans le calcul de l'infiltration, fait ressortir à nouveau l'écart entre une approche physique spatialisée et une approche conceptuelle. En effet,

dans *PermetAble* la charge hydraulique n'est pas constante sur toute la largeur de la fondation, elle est significativement plus importante droite et à gauche, au niveau de l'entrée du ruissellement dans la structure (Chapitre 3). La spatialisation de l'écoulement de l'eau dans la structure permet de représenter cette mise en charge non homogène et par suite permet de modéliser l'augmentation de l'infiltration dans le sol. En considérant un niveau d'eau homogène, le modèle *PorousCity* ne permet pas de rendre compte de ce phénomène.

Par ailleurs, l'équation 4.7 utilisée pour faire varier l'infiltration en fonction de la charge hydraulique ne prend pas en compte l'épaisseur de sol saturé liée à la progression du front d'infiltration. Cette grandeur ne en effet peut pas être considérée dans PorousCity puisque le front n'infiltration dans le sol n'est pas modélisé. Cette difficulté illustre ici les limites d'une telle approche conceptuelle pour le représentation fine de l'infiltration.

4.2.2.3 CONCLUSION SUR LA MODÉLISATION DES STRUCTURES PERMÉABLES AVEC *POROUSCITY*

Malgré une différence majeure dans la modélisation de l'infiltration, sous-estimée par le modèle *PorousCity* en comparaison avec les résultats du modèle *PermetAble*, la comparaison entre les résultats des bilans hydrologiques simulés par les deux modèles montre une adéquation acceptable.

La modélisation définie dans le modèle *PorousCity* sera donc utilisée pour l'exploration des bénéfices des revêtements perméables en conservant à l'esprit que l'infiltration est sous-estimée et par conséquence que le drainage est surestimé. Les résultats obtenus seront d'autant plus à relativiser que dans la suite de ce travail l'infiltration dans les structures perméables est calculée à partir de la seule valeur de perméabilité du sol, sans tenir compte de la hauteur d'eau stockée dans la fondation[26].

Les écarts d'estimation du ruissellement en surface, et du stockage et de l'infiltration dans la structure, soulignent l'influence des choix de modélisation sur les résultats. Le modèle *PermetAble* a pour objectif de représenter l'écoulement de l'eau dans la structure, pour cela il représente de façon spatialisée ses écoulements et permet d'observer des hétérogénéités spatiales dans le stockage et par suite l'infiltration. En revanche il n'a pas pour objet d'étudier les processus de surface à l'échelle du bassin versant. Il utilise donc une estimation du ruissellement entrant sans le détailler. Inversement, le modèle *PorousCity* détaille la génération du ruissellement de surface de façon spatialisé mais simplifie la représentation des processus dans la structure ce qui conduit à un écart dans l'estimation du stockage et de l'infiltration.

4.2.3 ANALYSE DE L'INFLUENCE DE LA DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT

Les valeurs retenues pour les différentes données d'entrée du modèle permettant de décrire le bassin versant influencent nécessairement les résultats de la modélisation. La détermination de ces valeurs a fait l'objet d'un travail d'étude et de description du bassin versant (Section 2.3) mais comporte parfois une part d'incertitude importante. Cette sous-section vise à analyser l'influence des valeurs retenues sur les résultats du modèle afin d'ajuster au besoin les valeurs utilisées et surtout afin de quantifier l'impact d'une variation de ces valeurs sur les résultats.

[26] Il aurait été préférable d'utiliser l'Équation 4.7 pour le calcul de l'infiltration mais les simulations d'exploration du modèle *PorousCity* avaient été réalisées avant la mise en évidence de ce point d'amélioration du modèle.

Pour ces simulations d'exploration de la caractérisation du bassin versant, une configuration de référence des données d'entrée a été définie :

- la topographie et l'occupation du sol sont décrites à partir des données raster de référence (configuration *Riva Bella*) ;
- les puits d'infiltration sont importés et pris en compte dans la modélisation ;
- des structures à revêtements perméables sont implantées sur le bassin versant (Figure 4.25), avec un ratio de 20 % de surface perméable sur la surface imperméable et une surface de 20 m^2 par structures perméables. Ces structures sont implantées sur les trottoirs, en commençant par les points de plus basse altitude ;
- enfin, les variables hydrologiques (coefficient d'interception des différentes surfaces, perméabilité du sol, volume de stockage des puits, propriétés des structures perméables) sont fixées à leur valeur de référence, présentées précédemment (4.1.4.2).

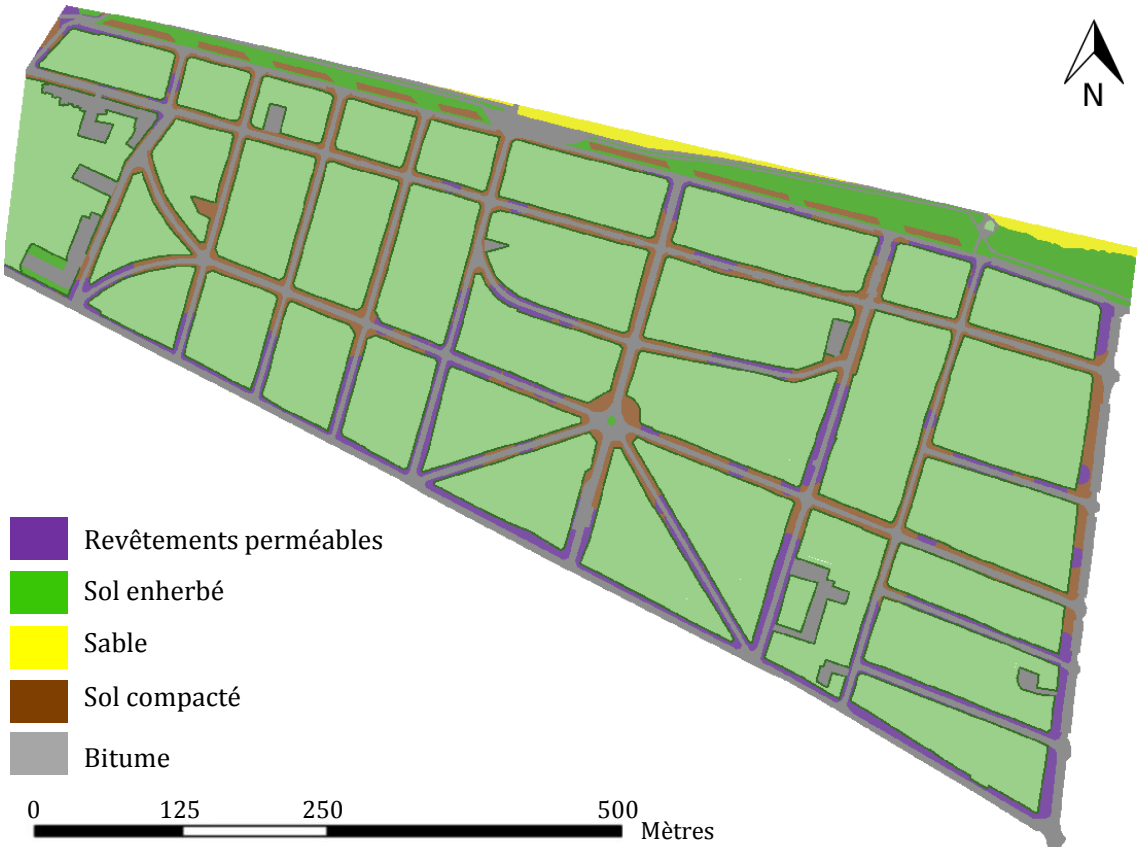


Figure 4.25 – Cartographie de l'implantation des revêtements perméables sur le bassin versant pour les simulations d'analyse de la description du bassin versant.

4.2.3.1 INFLUENCE DE L'INTERCEPTION

Pour étudier l'influence de la caractérisation de l'interception le plan d'expérience suivant (Tableau 4.11) a été conduit sur les variables globales correspondantes.

Tableau 4.11 – Valeurs des variables globales d'interception utilisées dans le plan d'expérience.

sand_interception	*grass_interception*	*gravel_interception*	*tarmac_interception*
3 ; 5 et 10 mm	5 ; 10 et 20 mm	3 ; 5 et 10 mm	1,5 ; 3 ; 5 ; 7,5 et 10 mm

Chaque simulation a été conduite une seule fois (pas de répétition des essais) en croisant toutes les combinaisons possibles entre les valeurs d'interception, pour un total de 135 simulations. Les résultats obtenus ont été analysés par régression linéaire multiple pour faire ressortir l'influence de chaque variable sur l'ensemble des indicateurs. Le Tableau 4.12 donne la valeur de R^2 et de la probabilité critique associée à F pour chacun des indicateurs de processus hydrologique.

Tableau 4.12 - Synthèse des critères de corrélation de l'analyse de sensibilité sur les variables d'interception.

	Runoff	Interception	Infiltration	Evaporation	PP_drain	Wells	Outflow
R^2	0,97	1,00	1,00	0,13	0,99	0,97	0,99
F	952,7	652067,7	11369,5	4,8	5521,9	1237,4	2684,9
Pr > F	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$	0,001	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$

Ces valeurs soulignent la très forte corrélation entre la variation des coefficients d'interception et la variation des volumes totaux des différents processus hydrologiques, à une exception près, l'évaporation. En effet, avec un R^2 de 0,13, il n'est pas possible de dégager une influence notable des valeurs de paramètres d'interception sur la valeur totale d'évaporation.

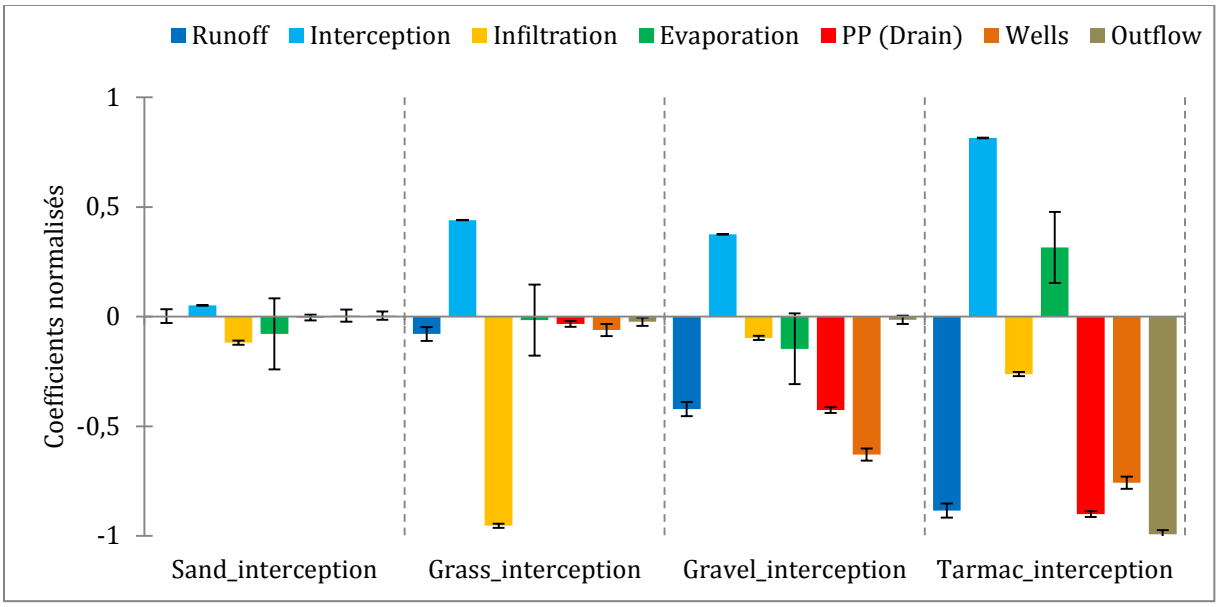


Figure 4.26 – Coefficients normalisés montrant l'influence de la valeur d'interception des différents types de revêtements de sol sur les processus hydrologiques.

La Figure 4.26 présente les coefficients normalisés de chaque variable pour chacun de ces indicateurs. Plus le coefficient est important plus la variable influence le processus étudié. Un coefficient normalisé négatif traduit une influence inverse (si l'infiltration augmente, le volume du processus hydrologique étudié diminue). Les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95 %. Comme pour l'exploitation des résultats du chapitre 3, si la barre d'erreur coupe l'axe des abscisses il n'est pas possible de dégager une influence notable de la variable sur le processus étudié.

Premier constat prévisible : ces résultats confirment que l'augmentation des valeurs d'interception entraîne une augmentation significative du volume d'interception total. Cette influence est la plus importante pour la valeur d'interception du bitume ('Tarmac'), suivie de celle de la végétation ('Grass') et de celle du sol compacté ('Gravel').

Concernant l'influence des variables d'interception sur les autres processus, la Figure 4.26 permet d'identifier la contribution de chacun des types de surface :

- **sable :** les résultats montrent que la valeur d'interception du sable n'a pas d'influence significative sur les autres processus hydrologiques que l'interception et l'infiltration ;
- **végétation :** la valeur d'interception a une influence significative majeure sur l'infiltration. Augmenter l'interception diminue fortement l'infiltration. Augmenter l'interception entraîne également une légère diminution du ruissellement, des volumes évacués par les RP et par les puits d'infiltration et du ruissellement vers l'extérieur du bassin versant ;
- **sol compacté :** la valeur d'interception a une influence significative sur l'ensemble des processus mis à part l'évaporation et le ruissellement vers l'extérieur ;
- **bitume :** la valeur d'interception du bitume est la plus influente des quatre. Elle impacte de façon significative tous les processus hydrologiques. La valeur d'interception du bitume est notamment la seule à avoir une influence significative sur l'évaporation.

Ces résultats et notamment l'influence inégale des différents types de surface, s'expliquent en premier lieu par la proportion de chacune des surfaces et leur localisation. En effet, le bitume et le sol compacté représentent respectivement 48,3 et 34,3 % des cellules actives.

Concernant la localisation : le sol compacté étant sur les trottoirs, il ne se retrouve jamais à proximité immédiate des limites du bassin versant, d'où la faible influence de sa variable d'interception sur ce processus. La même logique explique l'influence majeure de la valeur d'interception du bitume sur le ruissellement hors du bassin versant puisque les cellules en limite du bassin versant sont majoritairement de type 'bitume'.

L'influence de l'interception du bitume sur l'évaporation s'explique en raison du rôle de réservoir d'eau disponible pour l'évaporation du volume stocké par interception. Plus l'interception augmente, plus le volume d'eau disponible pour l'évaporation augmente. L'absence d'influence de la taille du réservoir d'interception des autres types de surface sur l'évaporation peut être expliquée par le critère de fin de simulation. En effet à $t = 500$ minutes il reste encore une lame d'eau interceptée sur les cellules, la taille de ce réservoir n'a ainsi pas « eu le temps » de devenir un facteur limitant l'évaporation.

Concernant les autres processus : augmenter l'infiltration réduit le volume d'eau ruisselé et donc logiquement réduit le volume qui rejoint les revêtements perméables ou les puits d'infiltration. Cela retarde également le moment où l'infiltration commence puisque cette dernière concerne le volume de ruissellement et non d'interception. D'où l'influence majeure de la valeur d'interception de la végétation sur l'infiltration (l'influence est moindre pour le sol compacté qui a un coefficient de perméabilité 50 fois moins important). Ces observations soulignent que l'interception joue un rôle temporisateur dans le modèle, elle stocke le début de la pluie, ralentissant et réduisant les autres processus excepté l'évaporation (qui évacue le volume intercepté après la pluie).

Au regard de l'influence de l'interception sur les résultats du modèle, il a été choisi de fixer des valeurs d'interception proches des estimations hautes données dans la littérature pour favoriser l'effet temporisateur de ce paramètre dans la modélisation et éviter de surestimer les processus d'infiltration et d'écoulement vers les RP et les puits d'infiltration.

4.2.3.2 INFLUENCE DE LA PERMÉABILITÉ DU SOL

La perméabilité du sol est une variable importante dans la caractérisation du bassin versant. Pour tester son influence sur le modèle les valeurs suivantes ont été données à K_s : $1 \cdot 10^{-7}$ m/s, $1 \cdot 10^{-6}$ m/s, $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, $1 \cdot 10^{-4}$ m/s. Ces valeurs progressent d'un contexte de sol peu perméable à un sol très perméable.

La Figure 4.27 présente les résultats des volumes totaux de chaque processus hydrologique à la fin de la simulation, exprimés en % du volume entrant. Ce graphique met en évidence l'influence de la perméabilité du sol sur le volume infiltré et drainé. L'infiltration passe en effet de 1 % du volume total entrant avec $K_s = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s, à 64 % avec $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s. L'influence est inverse concernant le drainage de l'eau en excès dans les revêtements perméables qui passe de 42 % à 10 %. Ces résultats montrent également que la valeur de perméabilité influence, dans une moindre mesure, le ruissellement de surface et le stockage dans la structure.

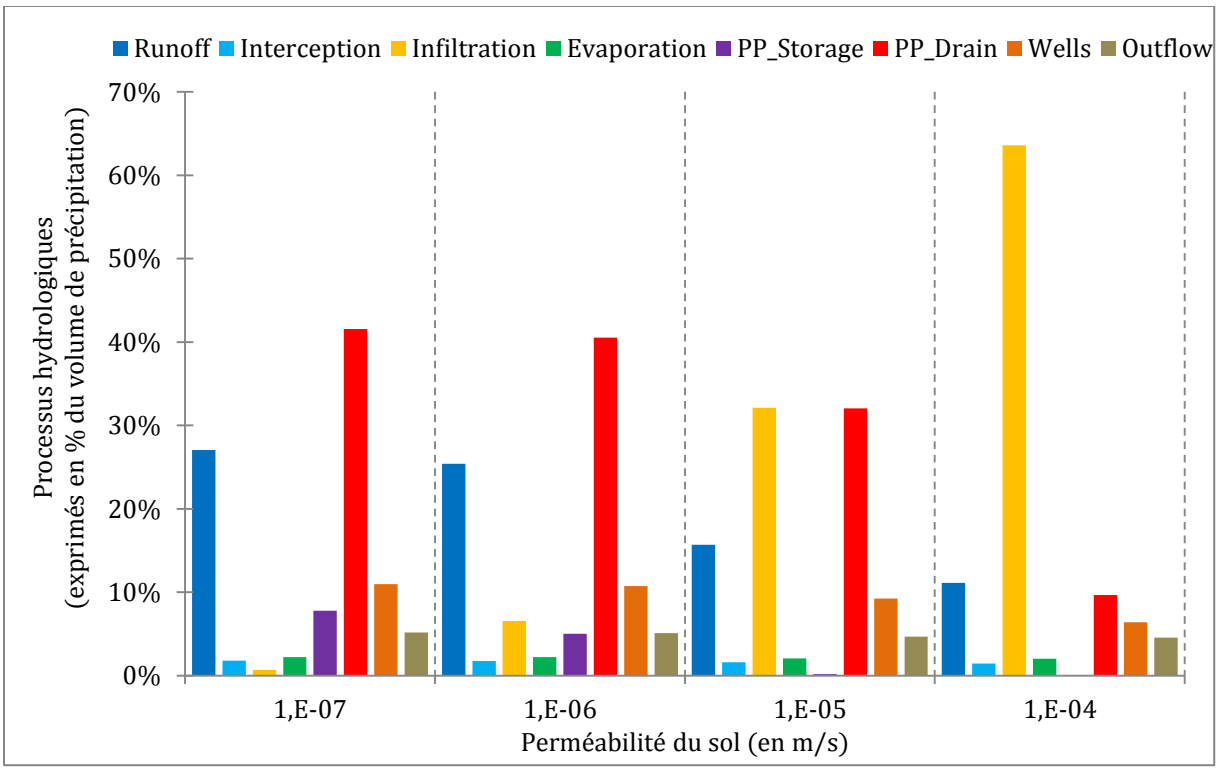


Figure 4.27 – Résultat des processus hydrologiques en fonction de la valeur de perméabilité du sol.

Ces résultats soulignent toute l'importance de la juste estimation de la valeur de perméabilité du sol. Pour le bassin versant modélisé, le choix d'une perméabilité de $1 \cdot 10^{-5}$ ou de $1 \cdot 10^{-4}$ m/s entraîne des écarts importants sur le bilan hydrologique modélisé. Pour préciser l'estimation de la perméabilité, ces deux valeurs sont testées lors de la confrontation des résultats du modèle avec les observations de terrain (4.2.4) dans le but de déterminer la valeur de perméabilité du sol à utiliser pour l'exploration du modèle *PorousCity*.

4.2.3.3 INFLUENCE DE LA MODÉLISATION DES PUITS D'INFILTRATION

Dans un premier temps, les puits d'infiltration ont été modélisés seulement par les avaloirs, en considérant que ces derniers avaient une capacité d'évacuation sans limite. Dans cette configuration, tout le ruissellement présent sur une cellule avec un avaloir est évacué à chaque pas de temps.

Cette représentation simplifiée a été modifiée ensuite et remplacée par la modélisation des puits d'infiltration présentée précédemment (4.1.4.3.e). Cette évolution s'appuie notamment sur des échanges avec M. Hitier et des habitants de Ouistreham qui constatent régulièrement la mise en charge et la saturation des avaloirs connectés aux puits d'infiltration (Chapitre 2, Section 2.3). Cette modélisation des puits d'infiltration comprend une seule variable, à savoir le volume de stockage du puits.

Pour étudier l'influence des choix de modélisation et de la valeur de stockage maximum dans les puits, six configurations ont été modélisées :

- une sans représentation des puits dans le modèle ;
- une avec une modélisation de type « avaloirs » (pas de limite de stockage) ;
- quatre avec une modélisation de type « réservoir » avec une valeur de stockage maximum de 500, 1000, 1500 et 2000 litres.

Dans chacun des cas, aucun revêtement perméable n'a été implanté pour éviter de produire un biais sur les résultats hydrologiques des puits d'infiltration.

Chaque configuration a été simulée cinq fois, soit un total de 40 simulations. La Figure 4.28 compare les résultats de ces simulations. Elle présente pour chacune le volume total évacué et stocké dans les puits d'infiltration à la fin de la simulation (*Wells*) et le volume total de ruissellement (*Runoff*).

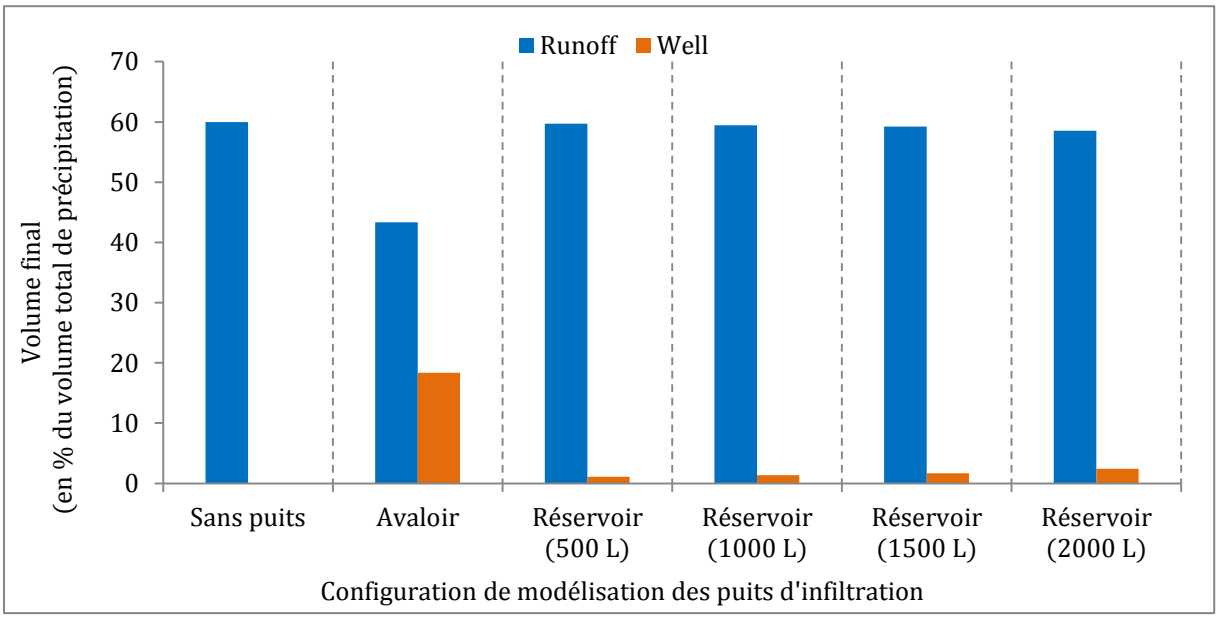


Figure 4.28 – Évolution du volume évacué par les puits d'infiltration et du ruissellement en fonction des choix de modélisation et de description des puits.

Il apparait tout de suite que la modélisation des puits sous la forme d'un réservoir de stockage (quel que soit le volume maximum renseigné) limite très fortement le volume d'eau évacué par rapport à la modélisation des seuls avaloirs.

Ces résultats montrent que dans le cas de la modélisation de type « réservoir », une saturation des puits a eu lieu. Du fait de cette saturation, la modélisation des puits n'entraîne pas de baisse significative du volume de ruissellement total par rapport à une simulation sans puits.

Avant d'analyser plus en détail ces résultats, il convient de rappeler que la simulation est réalisée avec la pluie de référence, à savoir l'orage du 22 juillet 2013 avec un cumul de précipitations de 83 mm en 3h. Il s'agit d'un événement climatique exceptionnel, donc une saturation des puits est logiquement attendue.

Concernant le choix du type de modélisation, ces résultats montrent que la modélisation de type « avaloir » surestime largement le rôle des puits d'infiltration et leur influence sur le ruissellement. Elle ne constitue donc pas un choix de modélisation valable. La modélisation de type « réservoir » semble donner des résultats plus cohérents, avec la saturation des puits. Le volume total évacué ou stocké par les puits peut sembler faible mais il s'explique en raison de l'ampleur de l'événement climatique modélisé.

Concernant l'influence du volume de stockage maximum sur les résultats, la Figure 4.28 montre une légère augmentation du volume *Well* quand le stockage maximum passe de 500 à 2000 litres. Pour étudier plus en détail le rôle de cette variable, les volumes stockés et infiltrés par les puits, pour les quatre valeurs de stockage maximum, sont détaillés sur la Figure 4.29.

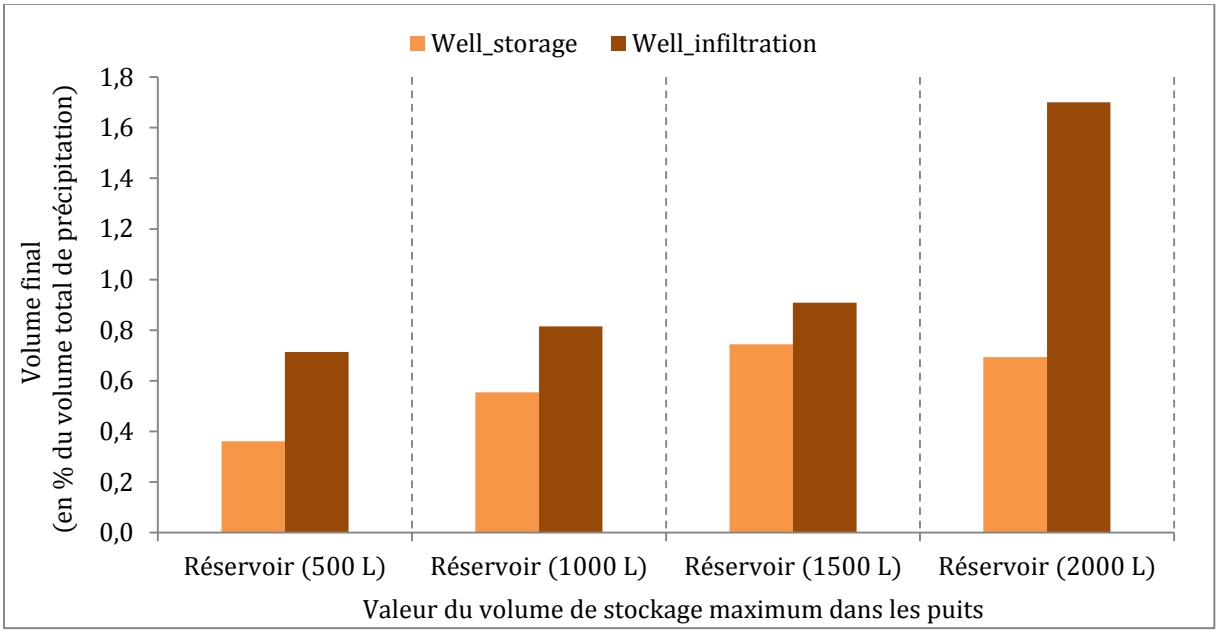


Figure 4.29 – Influence du volume de stockage maximum sur le volume stocké et infiltré par les puits d'infiltration (volume infiltré à la fin de la simulation et volume stocké maximum atteint pendant la simulation)

Ces résultats montrent que le passage d'un volume de 500 à 1500 litres ne s'accompagne pas d'une forte augmentation du volume infiltré (de 0,71 à 0,91 % du volume total de précipitation) mais logiquement par une augmentation du volume stocké (de 0,36 à 0,74 % du volume total de précipitation). En revanche, le passage de 1500 à 2000 litres montre des résultats différents. En effet, le volume final stocké diminue quand le volume maximum passe de 1500 à 2000 litres et le volume total infiltré augmente fortement (de 0,91 % à 1,70 % du volume total de précipitation).

Ces observations peuvent s'expliquer par la formule de calcul de la vitesse d'infiltration par les puits (Équation 4.6). Dans cette formule, le débit est fonction du volume de stockage pour rendre compte de l'influence de la hauteur de la colonne d'eau sur l'infiltration. Dans cette formulation, la surface horizontale du puits est fixe, et seule sa hauteur change. Avec un volume de stockage maximum plus important, la hauteur d'eau atteinte dans la structure est plus importante et donc le débit d'infiltration également.

Puisque les puits sont saturés pendant la pluie, au moment de la fin de la pluie, ils sont à leur hauteur de stockage maximum. Dans le cas d'un volume maximum de 2000 litres, le débit d'infiltration plus important permet de faire redescendre plus vite le niveau d'eau dans le puits, conduisant à un volume stocké plus faible que dans la configuration 1500 litres.

En conclusion, l'étude de la modélisation des puits d'infiltration a montré que, dans le cas d'un événement extrême, leur contribution au bilan hydrologique global est faible (de 1 à 2,4 % du volume total de précipitation). Ce choix de modélisation traduit correctement la saturation rapide des puits observée sur le terrain lors des événements importants. Ces résultats sont approfondis lors de la modélisation du bassin versant actuel.

4.2.3.4 INFLUENCE DES DONNÉES D'OCCUPATION DU SOL UTILISÉES

Comme cela a été développé dans la section 2.3 et au début de ce chapitre (4.1.4.2), deux jeux de données d'occupation du sol ont été produits. Un premier, qui couvre l'ensemble du bassin versant, avec une occupation du sol décrite à partir de photographies aériennes, et un second qui couvre seulement l'avenue de Verdun, avec un repérage sur le terrain de l'occupation du sol.

Sur la base de ces deux jeux de données, des simulations ont été conduites sur une sous-partie du bassin versant, zoomée autour de l'avenue de Verdun. Ces simulation utilisent soit la donnée de référence, dite *Riva Bella*, (tronquée pour correspondre à la zone simulée), soit la donnée détaillée, dite *Verdun*.

La comparaison entre les résultats obtenus vise à estimer l'erreur induite par une description simplifiée et à apporter des éléments de discussion sur le niveau de finesse des données nécessaires à la modélisation hydrologique d'un bassin versant urbain. En effet, une différence notable existe entre les deux jeux de données sur la description des trottoirs (Figure 4.30).

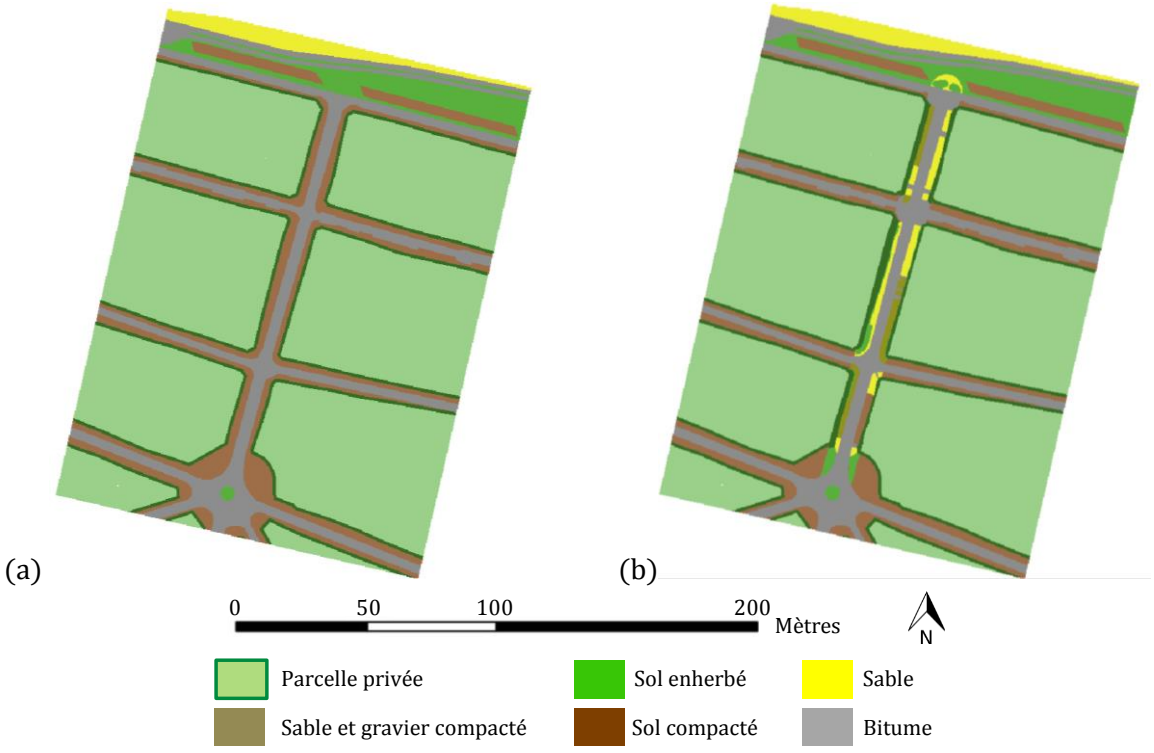


Figure 4.30 – Description de l'occupation du sol sur une sous-partie du bassin versant, zoomée autour de l'avenue de Verdun. (a) occupation du sol de référence (donnée *Riva Bella*). (b) occupation du sol détaillée (donnée *Verdun*).

La description détaillée remplace l'occupation du sol générique 'sol compacté' utilisée pour les trottoirs par différents types de revêtements : 'enherbé', 'sable', 'sable et gravier compactés'. Concrètement cela entraîne une augmentation de la perméabilité de surface (qui passe de $2 \cdot 10^{-7}$ m/s pour la typologie 'sol compacté', à $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, pour les typologies 'enherbé' et 'sable' et à $1 \cdot 10^{-6}$ m/s pour la typologie 'sable et gravier compactés') et une augmentation des valeurs d'interception (qui passent de 5 mm à respectivement 15, 10 et 5 mm).

Pour chaque jeu de données cinq simulations ont été réalisées. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.31. Les barres d'erreurs donnent l'écart type des résultats obtenus pour les cinq simulations.

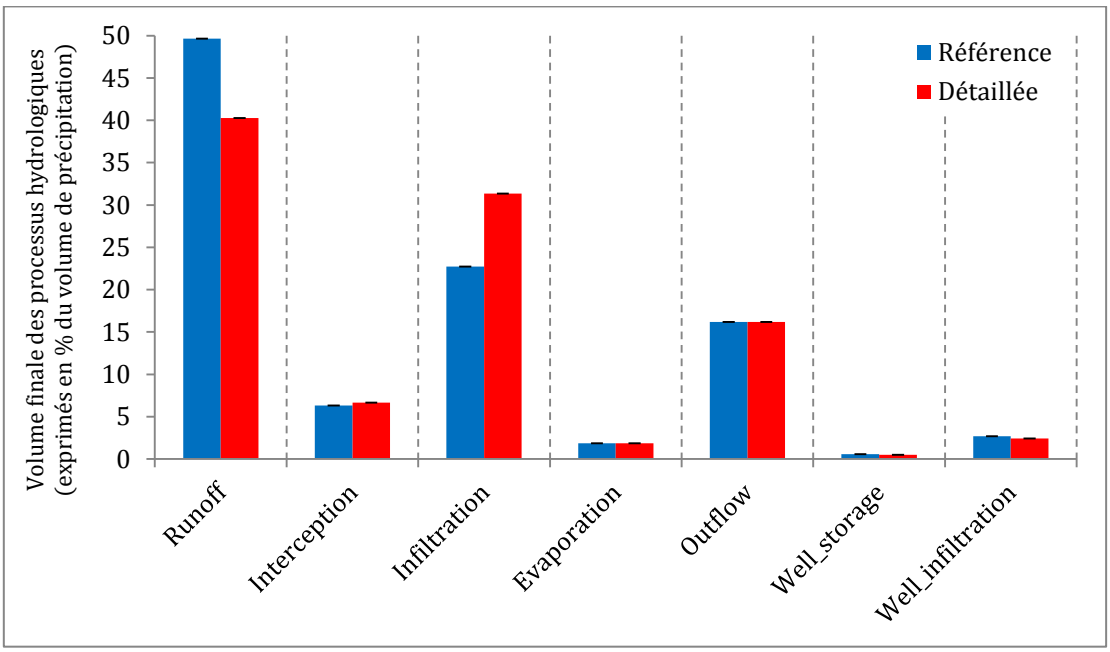


Figure 4.31 – Comparaison du bilan hydrologique des simulations réalisées avec le jeu de données *Riva Bella* (référence) et avec le jeu de données *Verdun* (détaillé) sur une sous-partie du bassin versant zoomé atour de l'avenue de Verdun. La barre d'erreur représente l'écart type des résultats sur cinq simulations.

Comme attendu, les valeurs d'infiltration de surface supérieures dans le cas détaillé entraînent une augmentation de l'infiltration et une diminution du ruissellement par rapport à la situation de référence (écart relatif de 10 % du volume total de précipitation). Le même constat s'observe, de façon beaucoup plus limitée, pour l'interception qui augmente légèrement avec les données détaillées (écart relatif de 1 % du volume total de précipitation). Conséquence de la diminution du ruissellement, le volume stocké et infiltré par les puits d'infiltration diminue avec les données détaillées. Enfin, l'utilisation de l'un ou de l'autre des jeux de données ne semble pas influencer le volume évaporé et le volume de ruissellement vers l'extérieur du bassin versant.

À noter que la part du volume ruisselé vers l'extérieur du bassin versant (Outflow) est bien plus importante ici que dans les résultats précédents, ce qui est logique puisque la modélisation ne représente pas l'ensemble du bassin versant, des écoulements sortant (Outflow) ou entrant (non représentés[27]) sont ainsi logiquement attendus.

[27] En raison de l'absence de la représentation des écoulements entrant ces simulations ne peuvent pas prétendre représenter le comportement hydrologique réel de la zone étudiée mais servent seulement ici de comparaison entre deux jeux de données.

Ces résultats sont d'autant plus significatifs que seul le type de revêtement des trottoirs de l'avenue de Verdun est modifié entre les deux simulations. Soit moins de la moitié des trottoirs de la zone modélisée. Un écart plus important pourrait logiquement être attendu si toute la zone avait été détaillée.

Trois observations peuvent être mises en avant à la lecture de ces résultats :

- Au regard de l'écart important sur l'infiltration, la valeur retenue pour la perméabilité du type de revêtement 'sol compacté' semble trop faible pour l'avenue de Verdun.

  Ce constat serait probablement différent (voir inversé) si la zone étudiée en détail avait présenté un revêtement de surface moins perméable (trottoirs bitumés), comme sur le boulevard du bord de mer ou l'ensemble de la partie ouest du bassin versant.

  Cette observation met en avant la difficulté de définir une valeur moyenne pour représenter des réalités de perméabilité diverses. En effet, la perméabilité des trottoirs à a été estimée à partir de celle du sol en posant : $K_{s\_trottoir} = K_{s\_sol} / 50$. Cette estimation arbitraire s'appuie sur le fait qu'une part importante (non quantifiée) des trottoirs est bitumée (donc avec une perméabilité nulle) mais qu'une partie non négligeable présente un revêtement plus hétérogène et plus ou moins perméable. Comme cela est justement le cas sur l'avenue de Verdun.

- Décrire l'occupation en utilisant un type de revêtement de sol homogénéisé pour un même type d'usage est une source importante d'écart entre les processus hydrologiques modélisés et réels[28]. Cette observation est notamment vraie dans le cas du bassin versant modélisé, dont le sol sableux à une perméabilité importante, ce qui entraîne des contrastes marqués entre les zones bitumées ou non.

  Pour réaliser une modélisation plus fidèle de la réalité il conviendrait de détailler l'occupation du sol non pas à partir d'une description en termes d'usages mais directement avec la description des types de revêtements de surface. La difficulté étant que la description des usages est une donnée généralement plus facilement disponible que celle du type de revêtement.

- Enfin, ces résultats soulignent un peu plus qu'il ne saurait être question de faire une exploitation de ce modèle pour quantifier exactement les processus réels du bassin versant dans sa situation actuelle ou future mais que son usage doit se limiter à la comparaison de scénarios entre eux pour donner une quantification relative et non absolue des processus hydrologiques.

En conclusion, les données de référence (données d'occupation du sol dites *Riva Bella*), utilisées par la suite, présentent une description homogène et inexacte des trottoirs. Cette représentation simplifiée induit une sous-estimation de l'infiltration, et dans une moindre mesure de l'interception, sur certaines parties du bassin versant (dont l'avenue de Verdun). Une telle approche permet de comparer des scénarios d'aménagement entre eux mais ne permet pas de représenter fidèlement le bassin versant réel.

[28] Ici il ne s'agit pas d'une comparaison avec des résultats réels mais avec une simulation qui détaille le type de revêtement de surface. Cette version détaillée étant assumée comme plus proche des processus réels.

4.2.4 VÉRIFICATION DES RÉSULTATS DU MODÈLE

Comme cela a été souligné à plusieurs reprises, le modèle *PorousCity* ne permet pas de représenter quantitativement les processus hydrologiques réels du bassin versant modélisé. Il convient cependant de trouver des points de vérification des résultats de ce modèle avant de l'exploiter pour comparer différents scénarios d'aménagement et d'usage des revêtements perméables.

Cette vérification s'appuie sur les observations des zones d'accumulation du ruissellement décrites dans la section 2.3. L'événement climatique du 11 juin 2015 est simulé dans le modèle dans le but de comparer la localisation et la hauteur de ruissellement modélisées avec les observations de terrain d'une part, et avec la localisation des puits d'infiltration d'autre part.

La sous-section précédente a souligné l'influence de la perméabilité du sol sur les résultats du modèle. Cette donnée détermine la valeur de perméabilité de surface de tous les types de revêtements et l'infiltration *via* les puits ou les RP. Les résultats précédents (4.2.3.2) ont notamment montré l'écart important sur les résultats entre une estimation de la perméabilité à $1{\cdot}10^{-4}$ ou à $1{\cdot}10^{-5}$ m/s. Aussi l'événements du 11 juin 2015 est simulé dans deux les configurations : $K_s = 1{\cdot}10^{-4}$ ou $1{\cdot}10^{-5}$ m/s pour estimer la valeur à conserver par la suite.

4.2.4.1 ÉVOLUTION DU RUISSELLEMENT EN FONCTION DE LA PERMÉABILITÉ DE SOL

Les résultats des deux configurations de perméabilité de sol sont présentés et comparés au regard du volume de ruissellement maximum (Figure 4.32), de la hauteur de ruissellement maximum (Figure 4.33), et de la répartition des cellules actives dans les différentes catégories de ruissellement tout au long de la simulation (Figure 4.34 et Figure 4.35).

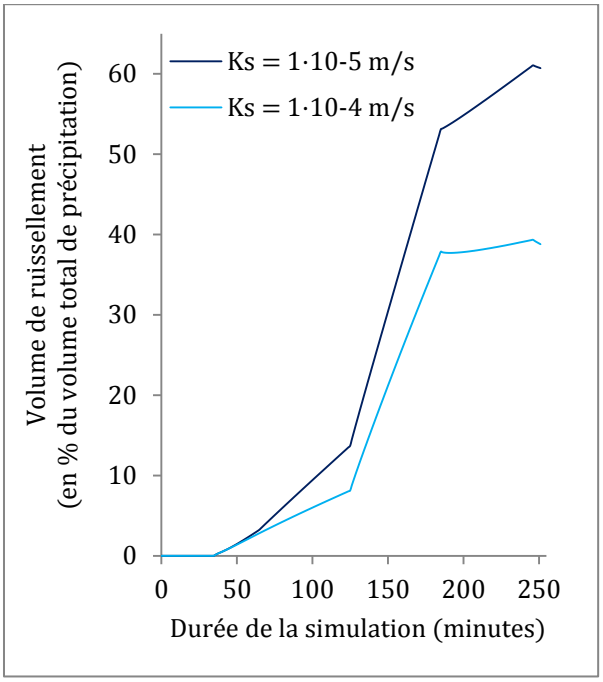


Figure 4.32 – Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution du volume total de ruissellement au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015.

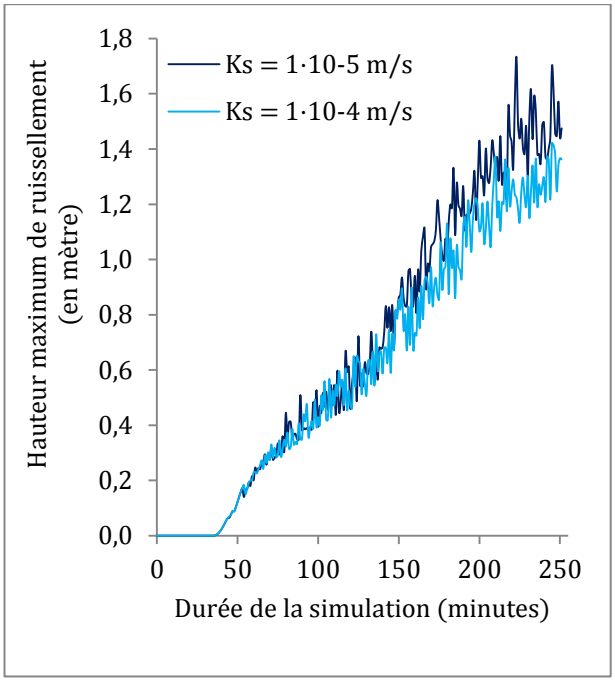


Figure 4.33 - Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution de la hauteur d'eau de ruissellement maximum au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015.

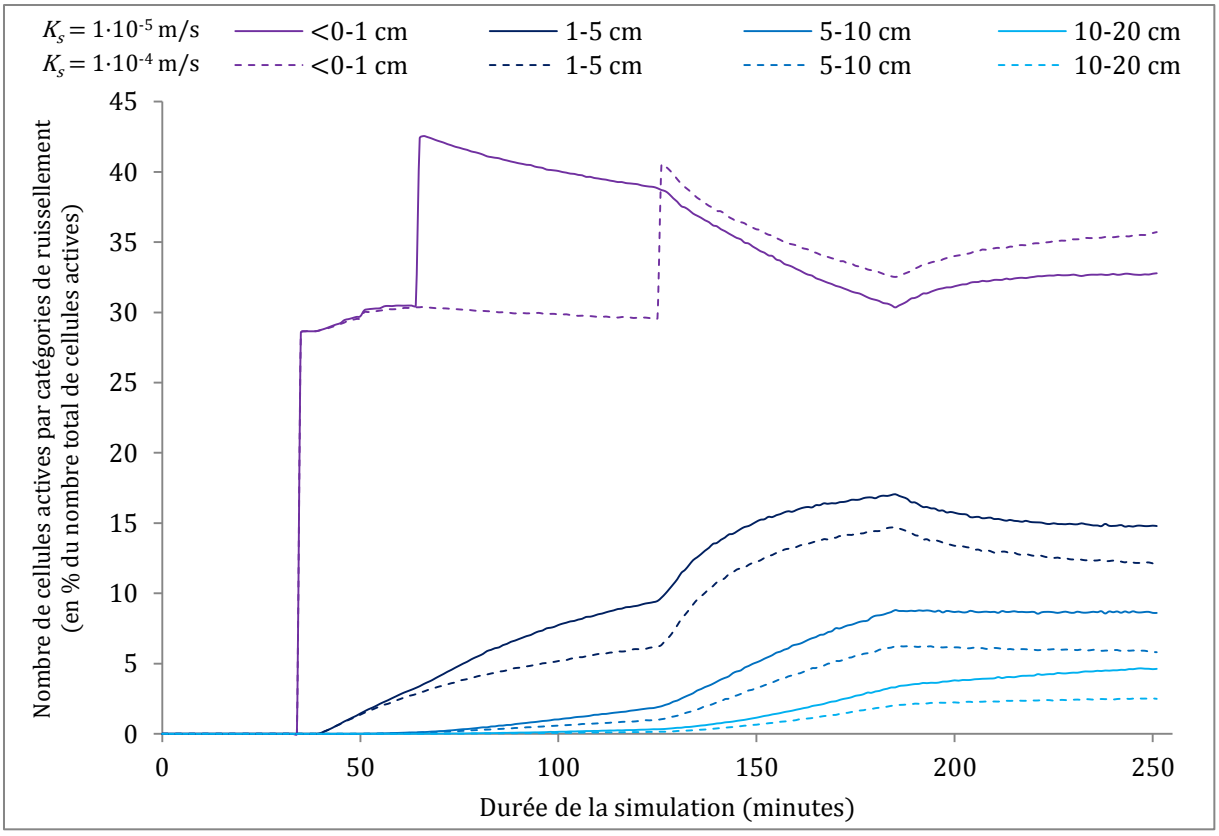


Figure 4.34 – Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution du nombre de cellules actives dans les catégories de ruissellement (de 1 à 20 cm) au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015.

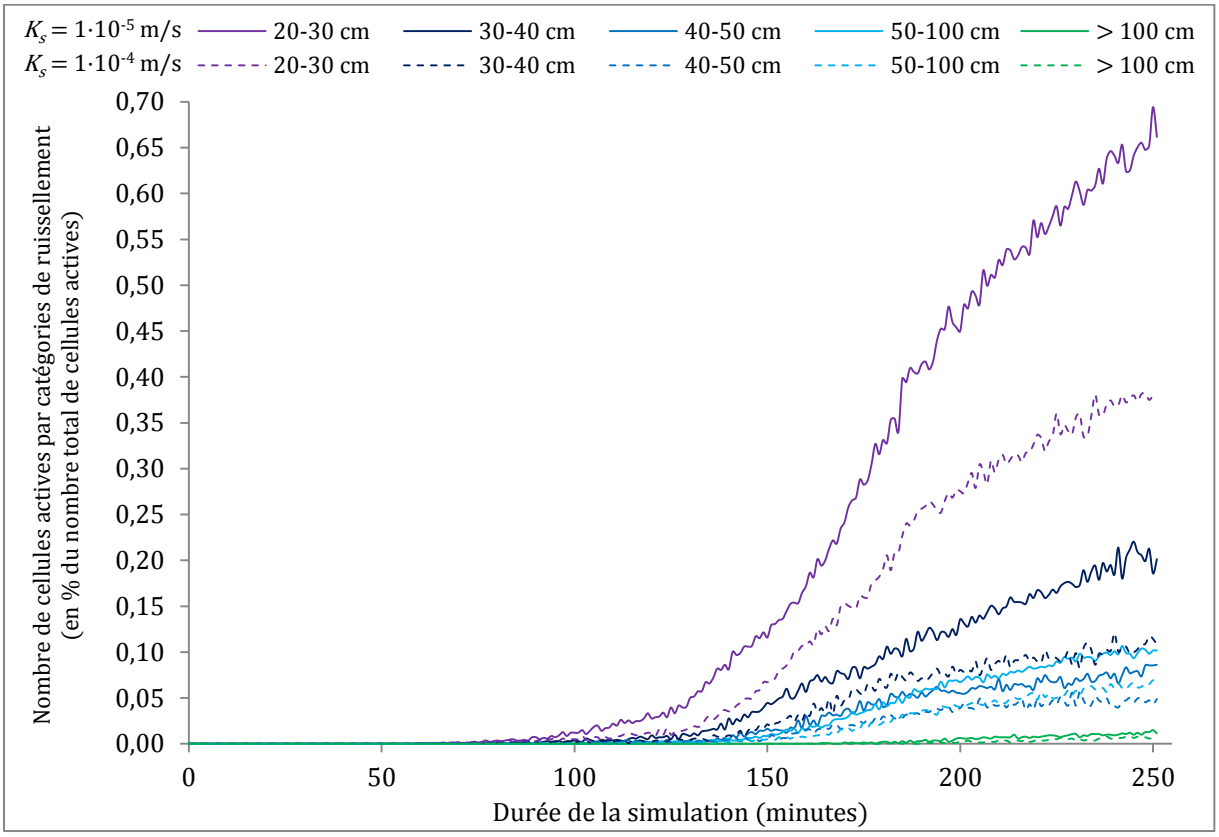


Figure 4.35 - Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution du nombre de cellules actives dans les catégories de ruissellement (de 1 à 20 cm) au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015.

- Le volume de ruissellement est maximum au moment de la fin de la pluie (et non au moment du pic de pluie) (Figure 4.32). Ce volume est logiquement moins important avec une perméabilité du sol suppérieure (39 % du volume total de pluie avec $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s contre 61 % du volume total de pluie si $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s).
- La hauteur d'eau de ruissellement maximum n'est pas fortement impactée par la modification de perméabilité du sol (Figure 4.33). Comme pour le volume total de ruissellement, elle est maximum au moment de la fin de la pluie, avec une valeur maximum simulée comprise entre 1,4 et 1,7 mètre, avec respectivement $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

  Ces valeurs sembles peu réalistes, et elles correspondent à des cas particuliers d'accumulation de ruissellement liés à la non modélisation des parcelles privées. L'existence de ces valeurs dans les résultats du modèle est à relativiser. En effet, la Figure 4.35 montre que le nombre maximum de cellules avec une hauteur de ruissellement supérieure à 1 mètre est inférieur à 0,01 % du nombre de cellules actives. (12 m² au maximum avec $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s, et 21 m² au maximum avec $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s). Il s'agit donc de cas spécifiques qui ne modifient pas notablement la simulation du ruissellement à l'échelle du bassin versant.
- Le nombre de cellules par catégorie de ruissellement évolue de façon similaire dans les deux conditions de sol, en étant systématiquement plus faible avec $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s (à l'exception de la catégorie <0-1 cm à partir de $t = 123$ minutes) (Figure 4.34 et Figure 4.35).

  Les deux courbes correspondant à la catégorie < 0-1 cm donnent des informations intéressantes sur la dynamique du volume de ruissellement (Figure 4.34). Elles montrent toutes deux un premier saut identique, qui correspond au moment où les cellules de type 'bitumé' ont leur réservoir d'interception saturé (*p_interception* = 2,5 mm). Les deux présentent ensuite un second saut, correspondant à la saturation de l'interception des cellules de type 'sol compacté' (*p_interception* = 5 mm). Ce second saut est retardé pour la configuration $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s en raison de la plus forte perméabilité des cellules de type 'sol compacté' ce qui retarde la saturation de l'interception. À partir de ce deuxième saut, les deux courbes présentent un profil similaire (mais décalé dans le temps). Jusqu'au pic de pluie, le nombre de cellules dans la catégorie <0-1 cm diminue, correspondant à leur « passage » vers les catégories supérieures. Après le pic de la pluie, le nombre de cellules dans la catégorie <0-1 cm augmente, correspondant au processus inverse (niveau d'eau de ruissellement qui baisse).

  Concernant les hauteurs de ruissellement importantes, la Figure 4.35 permet d'observer que, quelle que soit la valeur de perméabilité, le nombre total de cellules avec plus de 20 cm reste très faible. Ces cellules représentent au maximum 902 m² avec $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s, et 1598 m² avec $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s (soit respectivement 0,64 et 1,12 % du total de cellule actives).

  Au moment du pic de ruissellement, la majorité des cellules a un ruissellement compris entre <0 et 20 cm (56 et 61 % des cellules actives avec respectivement $K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-5}$ m/s). Ces espaces correspondent aux zones bitumées et avec un sol compacté. Elles sont représentées avec un dégradé de bleu en fonction de la hauteur de ruissellement sur la Figure 4.36. Le reste des cellules (soit respectivement 43 et 28 %) ne présente aucun ruissellement. Ces espaces correspondent aux zones enherbées, sableuses et à une partie de celles bitumées ou avec un sol compacté dont le ruissellement est rapidement évacué. Elles correspondent aux cellules en couleur (autres que bleu) sur la Figure 4.36.

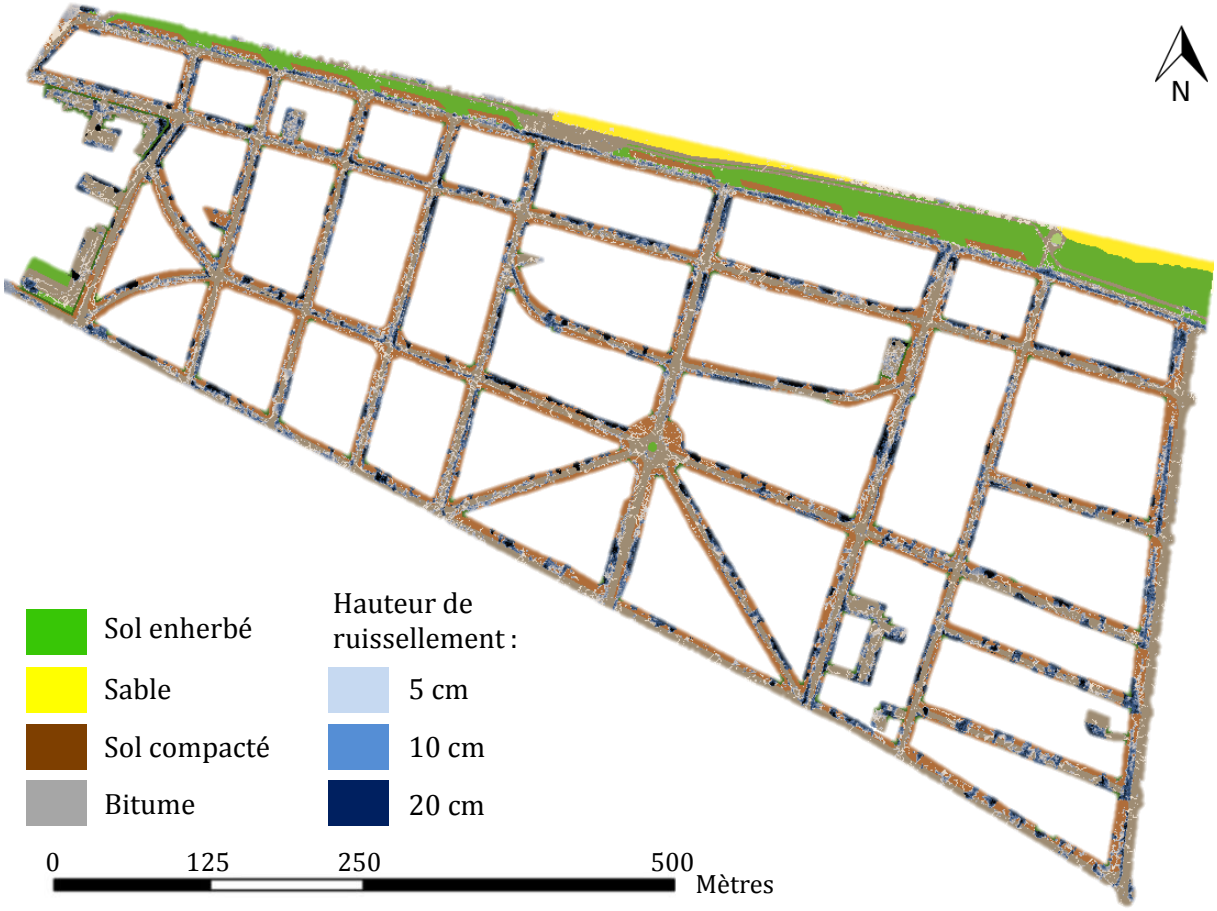


Figure 4.36 –Sortie du modèle *PorousCity*. Visualisation de la hauteur d'eau sur les cellules actives au moment de la fin de la pluie (volume de ruissellement maximum). Simulation de la pluie du 11/06/2015 avec $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s

Cette étude du ruissellement permet de souligner que le modèle représente le bon ordre de grandeur de la hauteur de ruissellement, avec une hauteur de 20 cm environ sur 2,5 à 5 % des cellules actives. Il reste maintenant à confronter la localisation des hauteurs de ruissellement modélisé avec les observations de terrain pour déterminer la valeur de perméabilité la plus juste et vérifier les résultats du modèle.

4.2.4.2 CONFRONTATION DES RÉSULTATS DU MODÈLE AVEC LES OBSERVATIONS DE TERRAIN

Dans cette sous-section, la comparaison des hauteurs d'eau modélisées et observées est loin d'être exacte. Les observations de terrain sont souvent qualitatives : « de l'eau », « beaucoup d'eau » et sont très partielles (l'ordre de grandeur de « beaucoup d'eau » est environ de 25 cm et celui de « de l'eau » de 10 cm). Aussi, au regard des incertitudes des observations de terrain, le critère de corrélation utilisé ici se résume à regarder si une zone observée comme inondée correspond bien à une zone de cellules en bleu foncé. En effet, les cellules en bleu foncé représentent des zones avec un niveau d'eau compris entre 10 et 20 cm (voire un niveau un peu supérieur à 20 cm pour certaines cellules), soit une hauteur d'eau similaire à celle observée par M. HITIER lors de l'événement du 11 juin 2015 (2.3.2.3).

Les figures 4.37 et 4.38 présentent la carte du niveau d'eau modélisé au moment du maximum de ruissellement lors de l'événement du 11 juin 2015, sur laquelle sont ajoutées les zones d'accumulation du ruissellement issues des observations de terrain.

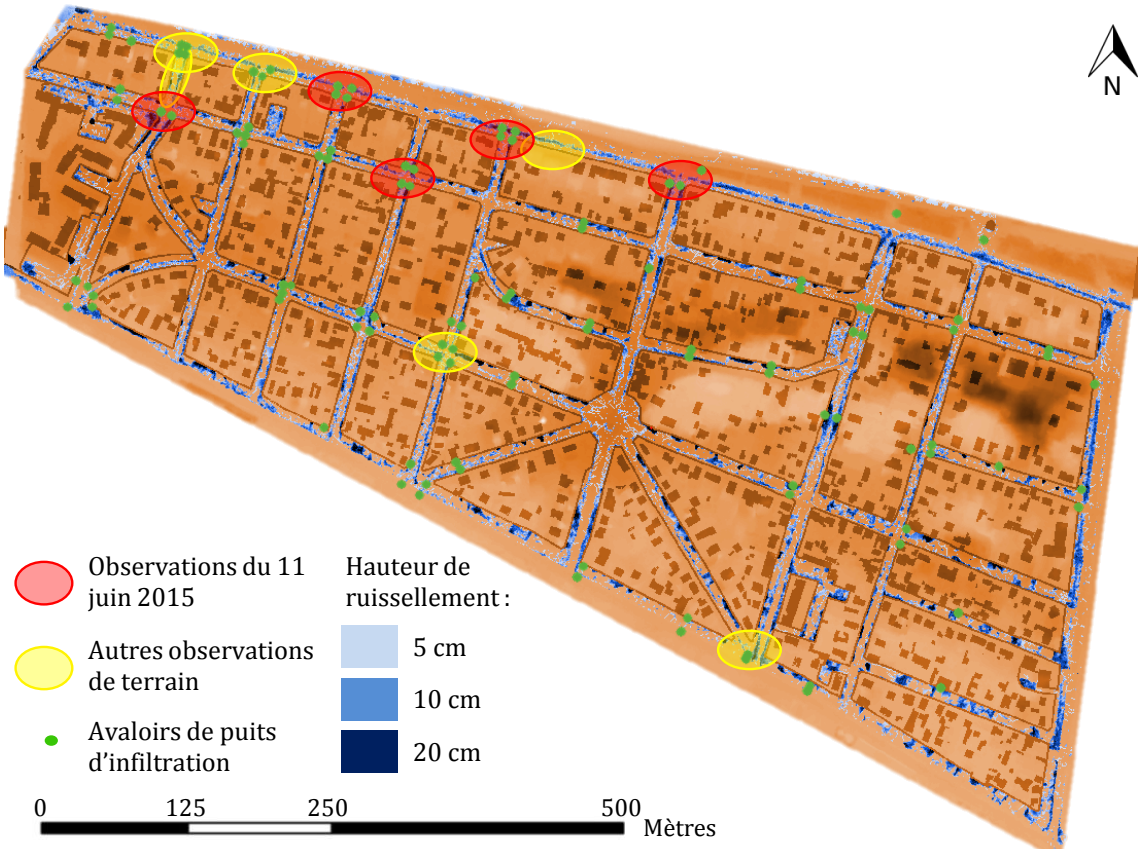


Figure 4.37 – Comparaison de la localisation des hauteurs de ruissellement à la fin de la simulation de la pluie du 11 juin 2015 (K_s= 1·10^{-5} m/s) avec les observations de terrains. Fond de carte topographique du bassin versant.

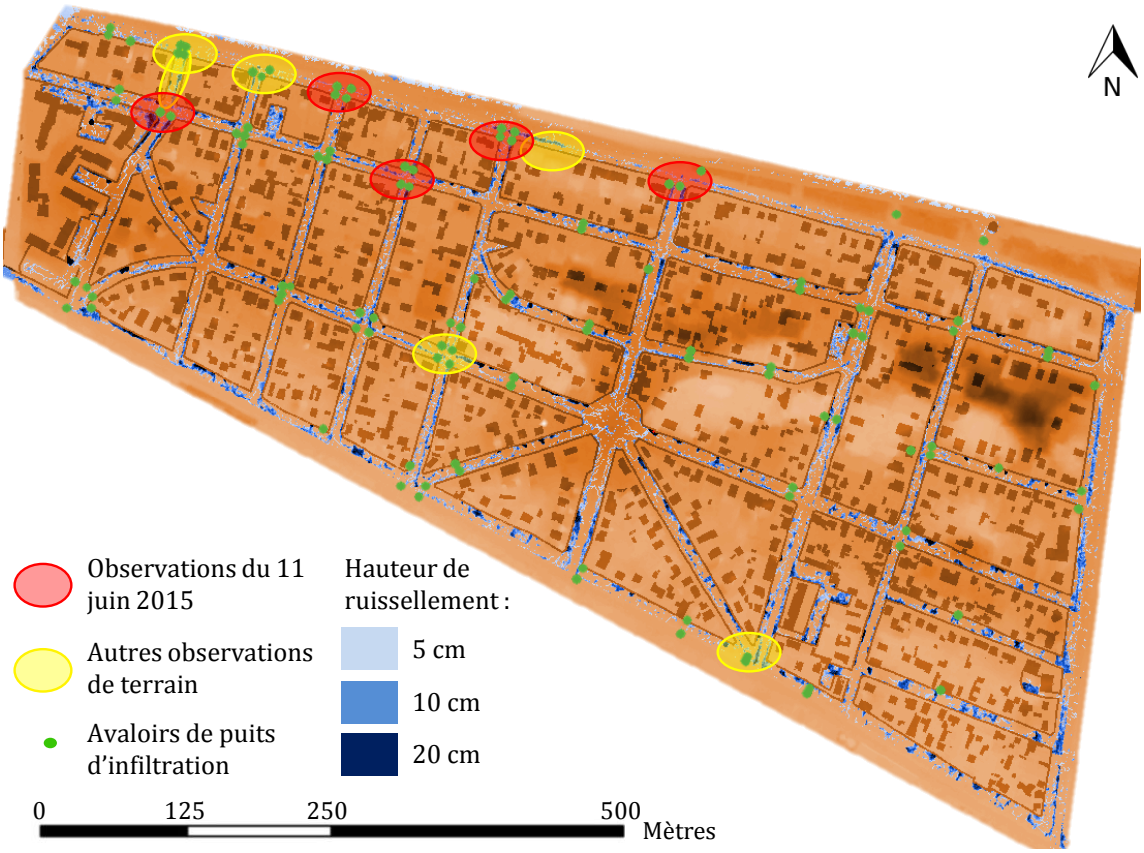


Figure 4.38 - Comparaison de la localisation des hauteurs de ruissellement à la fin de la simulation de la pluie du 11 juin 2015 (K_s= 1·10^{-4} m/s) avec les observations de terrains. Fond de carte topographique du bassin versant.

a. Choix de la perméabilité de sol retenue

Ces figures montrent une localisation d'ensemble similaire des hauteurs de ruissellement modélisées dans les deux configurations de sol. Une différence majeure ressort cependant le long du boulevard Aristide Briand, en front de mer. La hauteur de ruissellement est importante sur toute la longueur du boulevard avec une perméabilité, $K_s = 1{\cdot}10^{-5}$ m/s alors qu'avec $K_s = 1{\cdot}10^{-4}$ m/s le ruissellement est presque inexistant sur cette zone. Cette différence, localisée spécifiquement le long de la dune, s'explique probablement par une évacuation rapide de l'eau vers la dune et une moindre contribution au ruissellement des parkings situés le long du boulevard.

Or, les observations de terrain montrent que le boulevard Aristide Briand est l'un des lieux principaux d'accumulation du ruissellement, comme le soulignent les trois carrefours identifiés comme présentant « beaucoup d'eau » lors de l'événement du 11 juin 2015. La topographie du bassin versant, détaillée dans la section 2.3, souligne qu'une telle accumulation de l'eau est logiquement attendue au regard de la pente des rues perpendiculaires au boulevard et de la contribution au ruissellement des places de stationnement situées sur la dune (2.3.2.1).

La modélisation avec $K_s = 1{\cdot}10^{-4}$ m/s ne permet pas de reproduire le ruissellement observé sur cette partie spécifique du bassin versant. Cette valeur de perméabilité est donc écartée au profit de l'utilisation de $K_s = 1{\cdot}10^{-5}$ m/s qui donne un ruissellement continu sur le boulevard Aristide Briand, avec une concentration de l'eau le long de la bordure de la route du côté des places de stationnement (Figure 4.39).

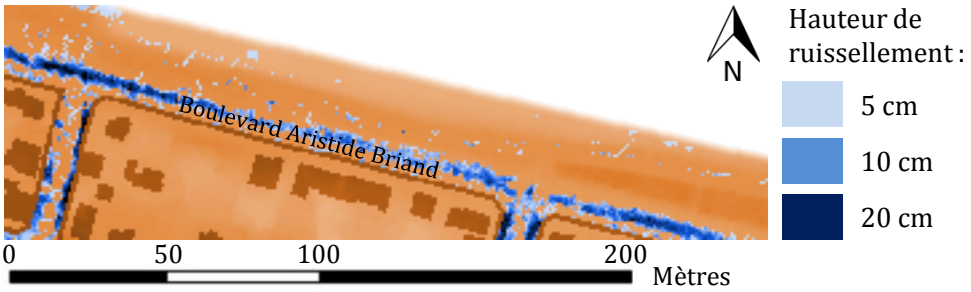


Figure 4.39 – Sortie du modèle *PorousCity*. Représentation de la hauteur d'eau ruisselée dans le cas de la modélisation avec $K_s = 1{\cdot}10^{-5}$ m/s. Zoom sur le Boulevard Aristide Briand.

b. Vérification des résultats de l'événement du 11 juin 2015

La confrontation des observations de terrain avec les résultats modélisés pour l'événement du 11 juin 2015 est présentée sur la Figure 4.37 ($K_s = 1{\cdot}10^{-5}$ m/s). La vérification des résultats est simplement graphique. Il apparait que le modèle simule bien une zone d'accumulation du ruissellement pour chaque zone identifiée comme avec « de l'eau » ou « beaucoup d'eau » lors de l'événement du 11 juin (en rouge sur la Figure 4.37) ainsi que sur les autres espaces où des inondations sont régulièrement observées (en jaune sur la Figure 4.37).

La confrontation entre les résultats de la modélisation et la localisation des puits d'infiltration montre également une bonne corrélation. Malgré l'évacuation de l'eau assurée par les puits, les résultats de la simulation montrent systématiquement une accumulation du ruissellement (avec une hauteur d'eau plus ou moins importante) à proximité des puits (à l'exception des trois puits situés sur la dune).

Ces observations sont à nuancer puisque les résultats de la modélisation montrent des zones d'accumulation du ruissellement réparties sur l'ensemble du bassin versant, ainsi que de nombreuses zones avec une hauteur d'eau simulée importante qui ne correspondent ni à un puits, ni à une observation de terrain. La relativement bonne corrélation observée ci-dessus pourrait ainsi simplement s'expliquer par une surestimation du ruissellement dans le modèle.

4.2.4.3 CONCLUSION SUR LA VÉRIFICATION DU MODÈLE

Cette sous-section souffre d'un manque de données et de critères objectifs et quantifiables pour comparer les observations de terrain et les résultats des simulations. Faute de pouvoir réaliser une « vraie » vérification du modèle, l'observation des résultats montre que l'ordre de grandeur des hauteurs d'eau simulées par le modèle est cohérent avec les observations de terrain et que la localisation des lieux d'accumulation du ruissellement ne présente pas d'incohérences majeures.

Cette vérification approximative des résultats ne permet pas de prétendre représenter le fonctionnement hydrologique du bassin versant modélisé mais elle donne quelques gages sur la capacité du modèle *PorousCity* à donner un ordre de grandeur juste des processus hydrologiques.

La confrontation avec les données de terrain a permis également de préciser la valeur de perméabilité du sol utilisée pour représenter le bassin versant. La valeur $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s est utilisée pour l'exploration du modèle *PorousCity*.

4.3 EXPLORATION DU MODÈLE *POROUSCITY*

L'exploration du modèle *PorousCity* vise à répondre aux objectifs de départ de la thèse autour de la quantification des bénéfices des revêtements perméables. Pour apporter des éléments de réponse, sept scénarios d'aménagement du bassin versant sont simulés avec les différentes typologies de pluie, dans le but de comparer leur bilan hydrologique. Ces scénarios sont présentés dans le Tableau 4.13. Leurs résultats sont analysés dans les sous-sections 4.3.1 à 4.3.4.

Tableau 4.13 – Scénarios simulés avec le modèle *PorousCity* pour comparer les bilans hydrologiques de différentes configurations d'aménagement

Scénario	Aménagement du bassin versant	Typologies de pluies	Sous-section
Référence	Avec les puits d'infiltration Sans revêtement perméable	Toutes	4.3.1
Trottoirs sable	Sans revêtement perméable Revêtement des trottoirs de type 'sable'	Événement de référence*	4.3.2
Trottoirs bitume	Sans revêtement perméable Revêtement des trottoirs de type 'bitume'	Événement de référence	
Trottoirs RP	Revêtement des trottoirs de type 'RP'	Événement de référence	
RP puits	Une zone RP de 5, 10 et 20 m de diamètre est implantée à l'emplacement de chaque puits d'infiltration.	Toutes	4.3.3
RP bas	Un ratio de 5, 10 et 20 % de RP est implanté sur les routes en partant des cellules d'altitude la plus basse.	Événement de référence	4.3.4
RP haut	Un ratio de 5, 10 et 20 % de RP est implanté sur les routes en partant des cellules d'altitude la plus haute.	Événement de référence	

* Pour rappel, l'événement de référence correspond à la pluie du 22 juillet 2013, soit un événement dit « extrême ».

En plus de ces scénarios, des simulations complémentaires ont été conduites pour analyser l'influence des propriétés des revêtements perméables[29] et l'influence de leur proportion, taille et localisation sur le bilan hydrologique du bassin versant. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les sous-sections 4.3.6 et 4.3.5. La synthèse des éléments de réponse apportés par l'exploration du modèle est présentée dans la conclusion de ce chapitre.

4.3.1 SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

Le scénario de référence représente le bassin versant dans un état actuel, avec la prise en compte des puits d'infiltration. Le bilan hydrologique est étudié pour les sept événements pluviométriques représentatifs des typologies de pluies retenues (section 2.4). Pour chaque pluie, la simulation est répétée trois fois, soit 21 simulations au total. La valeur moyenne de volume total de chaque processus hydrologique, 6h après la fin de la pluie, est présentée dans la Figure 4.40, en pourcentage du volume total de précipitation. Ces valeurs servent de référence pour comparer ensuite l'impact de la mise en œuvre de revêtements perméables.

[29] Sauf pour l'analyse des propriétés des RP, les variables de description des RP sont les suivantes : volume de stockage de 40 litres/m² (soit un drain à 10 cm du fond), perméabilité de surface de 1.10^{-4} m/s et interception (réservoir de rétention) de 10 mm (soit 10 litres /m²).

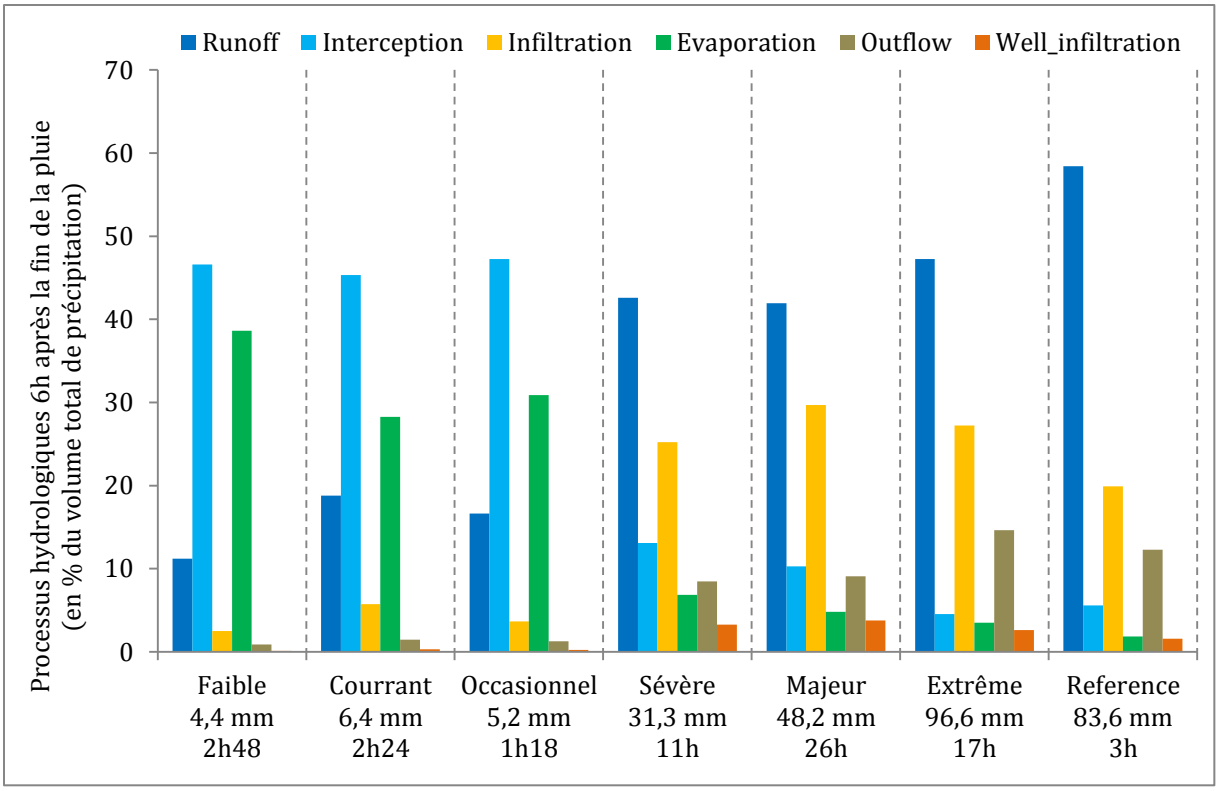


Figure 4.40 – Bilan hydrologique du scénario 'Référence', 6h après la fin de la pluie, pour les différentes typologies d'événements pluvieux modélisés (résultats exprimés en % du volume total de précipitation).

La Figure 4.41 présente les mêmes résultats, mais avec les volumes des processus exprimés en m^3 et non en pourcentage du volume de précipitation. Cette visualisation permet de comparer directement les volumes des processus hydrologiques entre les différents événements.

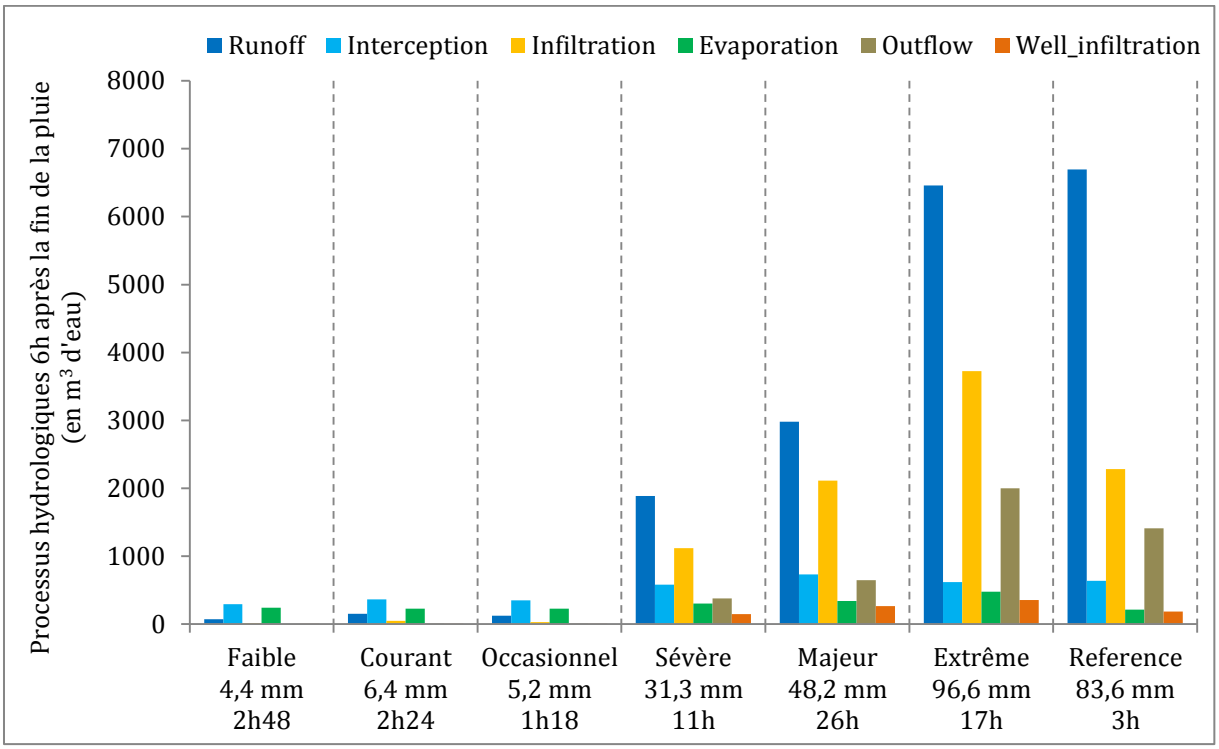


Figure 4.41 – Volume total des processus hydrologiques du scénario 'Référence', 6h après la fin de la pluie, pour les différentes typologies d'événements pluvieux modélisés (résultats exprimés en m^3).

Les figures 4.40 et 4.41 permettent de mettre en avant quelques observations.

- Deux groupes se dégagent des résultats : les événements de faible cumul pluviométrique pour lesquels l'interception et l'évaporation ressortent comme les deux processus hydrologiques principaux et les événements avec un cumul de précipitation plus important, pour lesquels les processus hydrologiques principaux sont le ruissellement et l'infiltration.

  Ce constat s'explique par les résultats de la Figure 4.41, qui montrent que le volume d'interception et d'évaporation évolue peu entre les différentes catégories de pluie. Ces résultats de modélisation traduisent ici le rôle dit de « pertes initiales » de l'interception sur la génération du ruissellement. Logiquement, tant que le cumul de précipitation ne dépasse pas l'ordre de grandeur de l'interception c'est ce processus qui est majoritaire.

  Par ailleurs, les résultats sur le volume d'infiltration et d'évaporation font ressortir un biais du modèle. En effet, l'infiltration ne s'applique qu'au volume de ruissellement et non au volume intercepté, elle est donc probablement sous-estimée pour les trois événements les plus faibles. Au contraire, l'évaporation étant le seul processus de vidange de la lame d'eau interceptée, ce processus est probablement légèrement surestimé. Il faut donc considérer ici l'infiltration comme une infiltration en profondeur (vers la nappe), le volume d'eau infiltré dans les premiers centimètres de sol (recharge hydrique) étant comptabilisé dans le volume d'interception et évapo-transpiré ensuite.

- Les résultats des événements « faible », « courant » et « occasionnel » montrent que le volume de ruissellement semble plus lié au cumul de précipitation qu'à l'intensité de la pluie. En effet, le ruissellement est supérieur pour l'événement dit « courant », avec un cumul de 6,4 mm, qui a une intensité moindre que l'événement dit « occasionnel ». En revanche, le pourcentage représenté par le ruissellement dans le bilan hydrologique semble plus lié à l'intensité qu'au seul cumul pluviométrique pour les événements dits « sévère », « majeur » et « extrême » (comparaison de l'événement sévère avec le majeur et des deux événements extrêmes entre eux).

  Ces résultats viennent nuancer l'analyse faite dans la section 2.4 sur la classification des événements avec l'intensité utilisée comme critère pour les événements faibles (< 25 mm de cumul de pluie) et le cumul de précipitation pour les événements supérieurs.

- Le volume évacué par les puits est relativement faible, inférieur à celui évacué par ruissellement vers l'extérieur du bassin versant. Comme précisé précédemment (4.2.3.3), cela s'explique en partie par la saturation des puits qui limite leur efficacité. Concernant le volume qui ruisselle hors du bassin versant, les valeurs obtenues témoignent probablement d'un découpage imparfait des limites topographiques exactes du bassin versant, notamment pour la limite sud et est.

- Enfin, quel que soit l'événement pluvieux simulé, les bilans hydrologiques présentés sur la Figure 4.40 montrent que 6h après la fin de la pluie, un ruissellement est encore présent sur le bassin versant.

  Pour approfondir l'analyse de la phase d'évacuation de l'eau après la pluie, les volumes des processus hydrologiques sont présentés 24h après la fin de la pluie sur la Figure 4.42, pour les quatre événements les plus courts (correspondant aux catégories « faible », « courante », « occasionnelle » et à la catégorie « extrême » dite de référence).

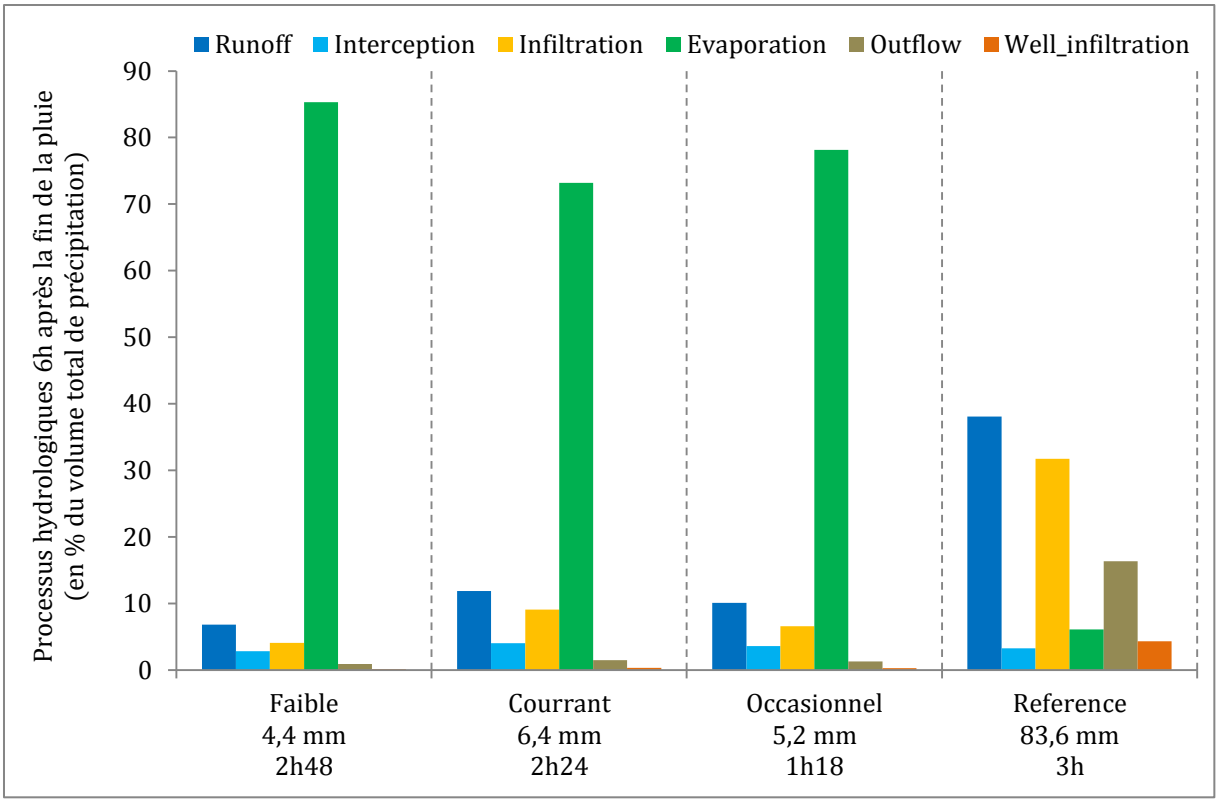


Figure 4.42 - Bilan hydrologique du scénario 'Référence', 24h après la fin de la pluie, pour les différentes typologies d'événements pluvieux modélisés (résultats exprimés en % du volume total de précipitation).

Logiquement, le volume de ruissellement modélisé est plus faible 24h après la fin de la pluie. Cette diminution se fait au profit de l'évaporation pour les trois événements les plus faibles et au profit de l'infiltration pour l'événement de référence.

Un ruissellement reste néanmoins présent dans tous les cas. Pour les événements « faible », « courant » et « occasionnel », ce volume témoigne d'une sous-estimation des processus de vidange par le modèle (notamment de l'absence de prise en compte des écoulements vers les parcelles privées). Pour l'événement extrême de référence, la sous-estimation liée au modèle n'explique probablement pas tout le volume de ruissellement restant.

Ces résultats illustrent l'intérêt potentiel de la mise en œuvre de revêtements perméables pour diminuer le pic de ruissellement et accélérer la vidange de l'eau sur le bassin versant. Ce potentiel théorique est exploré dans les scénarios suivants.

4.3.2 SCÉNARIOS D'AMÉNAGEMENT DES TROTTOIRS

Les trottoirs représentent un espace à enjeux pour ce travail de modélisation, à la fois en raison de la difficulté à décrire leur revêtement de surface avec précision (4.2.3.4) et en raison de l'historique de leur aménagement, présenté dans la section 2.3.

Pour explorer l'influence de l'aménagement des trottoirs sur le bilan hydrologique du bassin versant, trois scénarios sont testés en modifiant le type de revêtement de surface de l'ensemble des trottoirs (pour rappel les trottoirs représentent 40 % des cellules actives) :

- un scénario 'sable' qui correspond à un état antérieur, à l'époque où les trottoirs n'étaient pas imperméabilisés et majoritairement composés du sable de la dune ;

- un scénario 'bitume' qui correspond à une projection future, où l'aménagement urbain aurait entraîné l'imperméabilisation de l'ensemble des trottoirs ;
- un scénario 'revêtements perméables (RP)' qui correspond à une projection future, où l'aménagement des trottoirs serait réalisé avec des structures à revêtements perméables.

Les puits d'infiltration ne sont pas considérés dans ces trois scénarios et seule la pluie de référence est modélisée.

Les résultats de ces scénarios (Figure 4.43) sont également comparés avec le scénario de référence, pour lequel le revêtement de surface des trottoirs est considéré comme un 'sol compacté', peu perméable, et qui inclut des puits d'infiltrations.

Le volume *PP_infiltration* (22,6 %) représente le volume infiltré par les structures à revêtements perméables, il est distingué du volume drainé *via* les revêtements perméables *PP_Drain* (42,1 %).

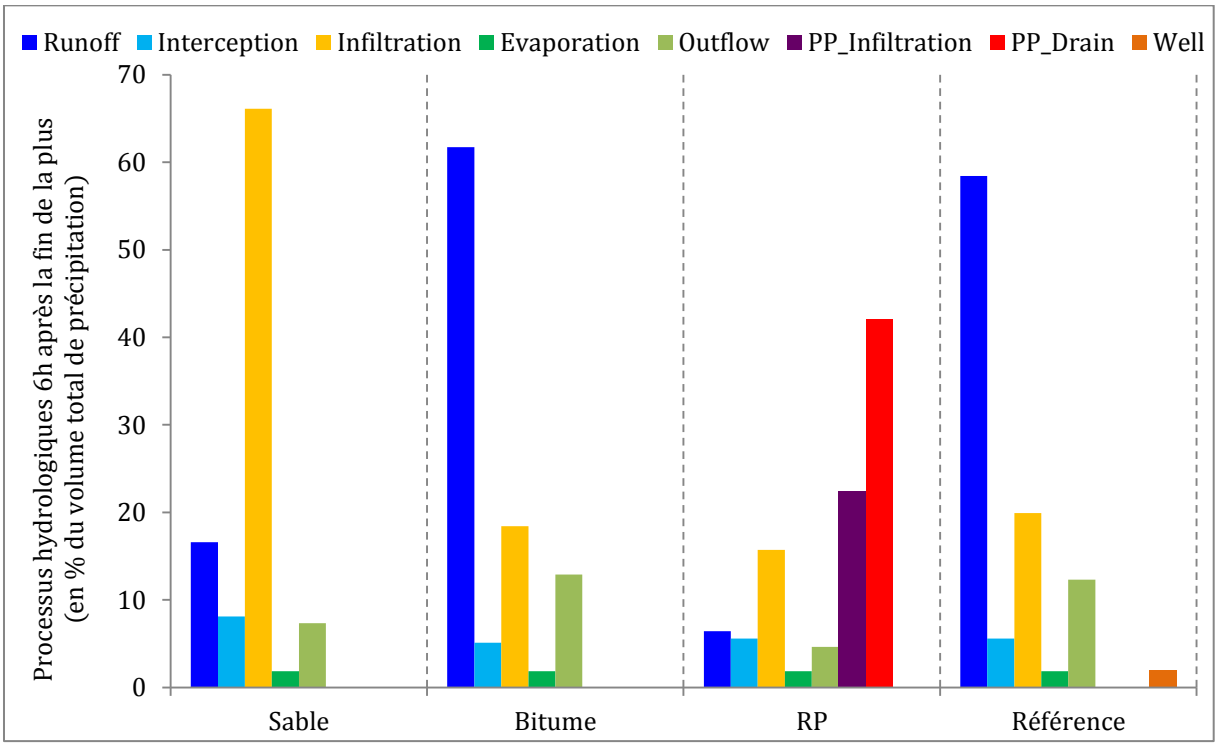


Figure 4.43 - Bilan hydrologique des scénarios 'Trottoirs' et 'Référence' pour la pluie « extrême » de référence, 6h après la fin de la pluie (résultats exprimés en % du volume total de précipitation).

Pour analyser ces résultats, la Figure 4.44 présente les écarts entre le volume des processus des scénarios 'trottoirs' et celui de référence.

Pour cette analyse, le volume *Well*, visible sur la Figure 4.43, correspondant au volume infiltré et stocké dans les puits d'infiltration pour le scénario de référence est considéré comme un volume infiltré, tout comme le volume dit *PP_infiltration* du scénario 'RP'.

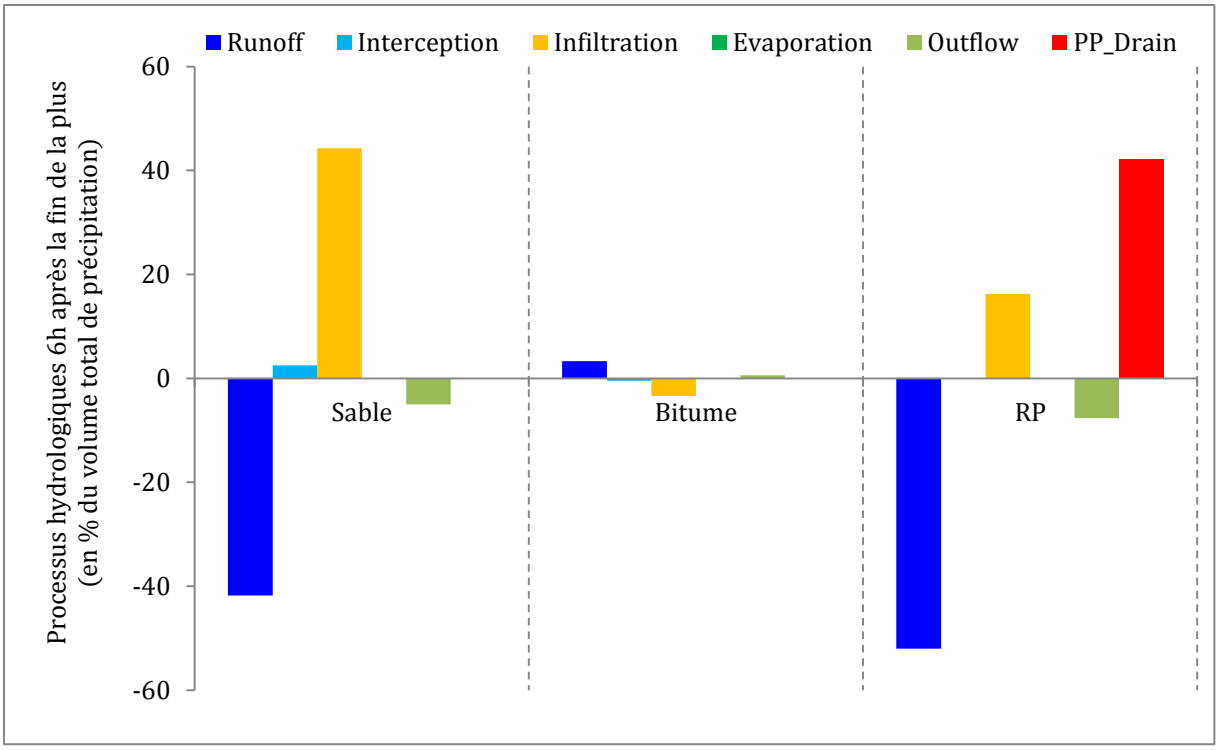


Figure 4.44 – Écarts de volume des processus hydrologiques des trois scénarios 'trottoirs' avec le scénario 'référence' (résultats exprimés en % du volume total de précipitation).

Plusieurs observations peuvent être tirées de ces résultats :

- le scénario 'bitume' n'entraine pas de modification majeure du bilan hydrologique par rapport au scénario de référence. Ce scénario entraine seulement une légère augmentation du ruissellement en raison de la diminution de l'infiltration. Cette observation souligne le caractère peu drainant du type de revêtement 'sol compacté' et la faible efficacité des puits d'infiltration dans le modèle ;
- les scénarios 'sable' et 'RP' entrainent comme attendu une diminution importante du ruissellement. Il est intéressant de noter que c'est le scénario 'RP' pour lequel cette diminution est la plus importante. Ce qui s'explique par la valeur utilisée de perméabilité en surface des revêtements perméables ($1 \cdot 10^{-3}$ m/s), largement suffisante pour absorber tout le ruissellement sur ces cellules, et par la présence d'un drain dans les structures perméables empêchant leur saturation ;
- l'intérêt manifeste des revêtements perméables souligné par la réduction du ruissellement est à relativiser en comparant les variations du volume total infiltré. En effet, le scénario 'sable' entraine une augmentation de l'infiltration nettement plus importante que celle du scénario 'RP' (+ 44 % contre + 16%). Le volume d'infiltration plus faible du scénario 'RP' s'explique en raison de la part importante de l'eau évacuée par le drain (42 % du volume de précipitation). Dans ce contexte, les revêtements perméables sont donc moins performants (du point de vue hydrologique) qu'un revêtement de sable.

  Ces résultats sont à nuancer en raison de la sous-estimation de l'infiltration dans le modèle *PorousCity*. De plus, la répartition entre le drainage et l'infiltration dépend de la valeur du volume maximum de stockage utilisée, pour ce scénario *PP_max_storage* = 40 litres par mètre carré soit un drain situé à 10 cm du fond de la structure.

4.3.3 SCÉNARIOS 'RP PUITS'

Les scénarios 'RP Puits' consistent à implanter une zone de revêtements perméables à l'emplacement de chaque puits d'infiltration. Ce choix d'implantation permet *a priori* de placer les structures à revêtements perméables sur des zones d'accumulation du ruissellement, donc théoriquement d'optimiser leurs bénéfices.

Les zones de revêtements perméables se trouvent ainsi placées au niveau de certains carrefours du bassin versant. Ces scénarios sont déclinés suivant trois tailles d'implantation des RP différentes : 5 mètres, 10 mètres et 20 mètres de diamètre, soit respectivement un ratio de surface perméable sur la surface imperméable de 2, 6 et 16 %. Concrètement, ces scénarios permettent de tester une implantation des RP d'une surface équivalente à celle des passages piétons (5 mètres) jusqu'à une surface équivalente à celle des carrefours (20 mètres).

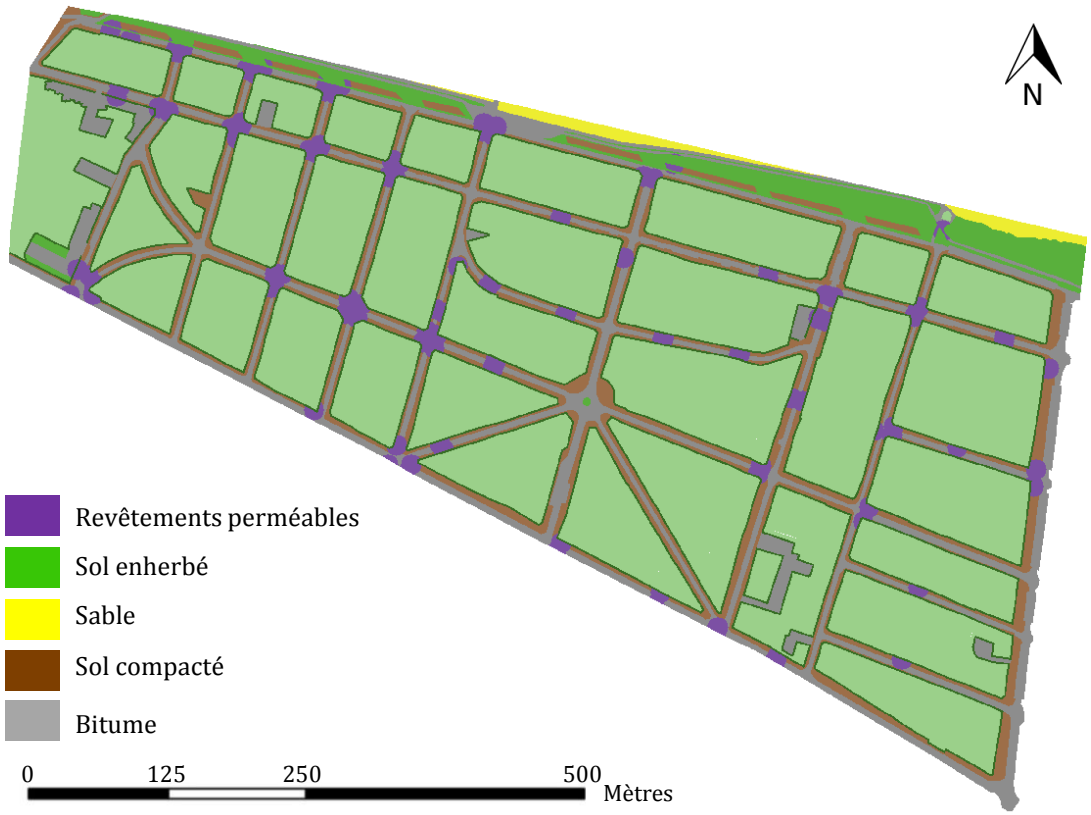


Figure 4.45 – Cartographie de l'occupation du sol pour le scénario 'RP Puits' avec une taille d'implantation des revêtements perméables de 20 mètres.

Les sept catégories d'événements pluviométriques sont testées pour ces trois configurations d'implantation des RP, soit un total de 21 simulations. Les résultats de ces scénarios sont comparés avec ceux du scénario de référence. Ces scénarios permettent d'étudier les bénéfices des revêtements perméables pour les différentes catégories d'événements pluvieux et d'observer qu'elle est l'influence de l'augmentation de la surface perméable sur ces bénéfices.

La Figure 4.46 présente l'écart des processus hydrologiques des différents scénarios avec ceux du scénario de référence (exprimé en % du volume total de précipitation). Comme précédemment, le volume *PP_infiltration* correspondant à l'infiltration *via* les RP est ajouté au volume d'infiltration de surface pour les scénarios 'RP_Puits' et le volume infiltré par les puits d'infiltration est ajouté au volume d'infiltration de surface pour le scénario de référence.

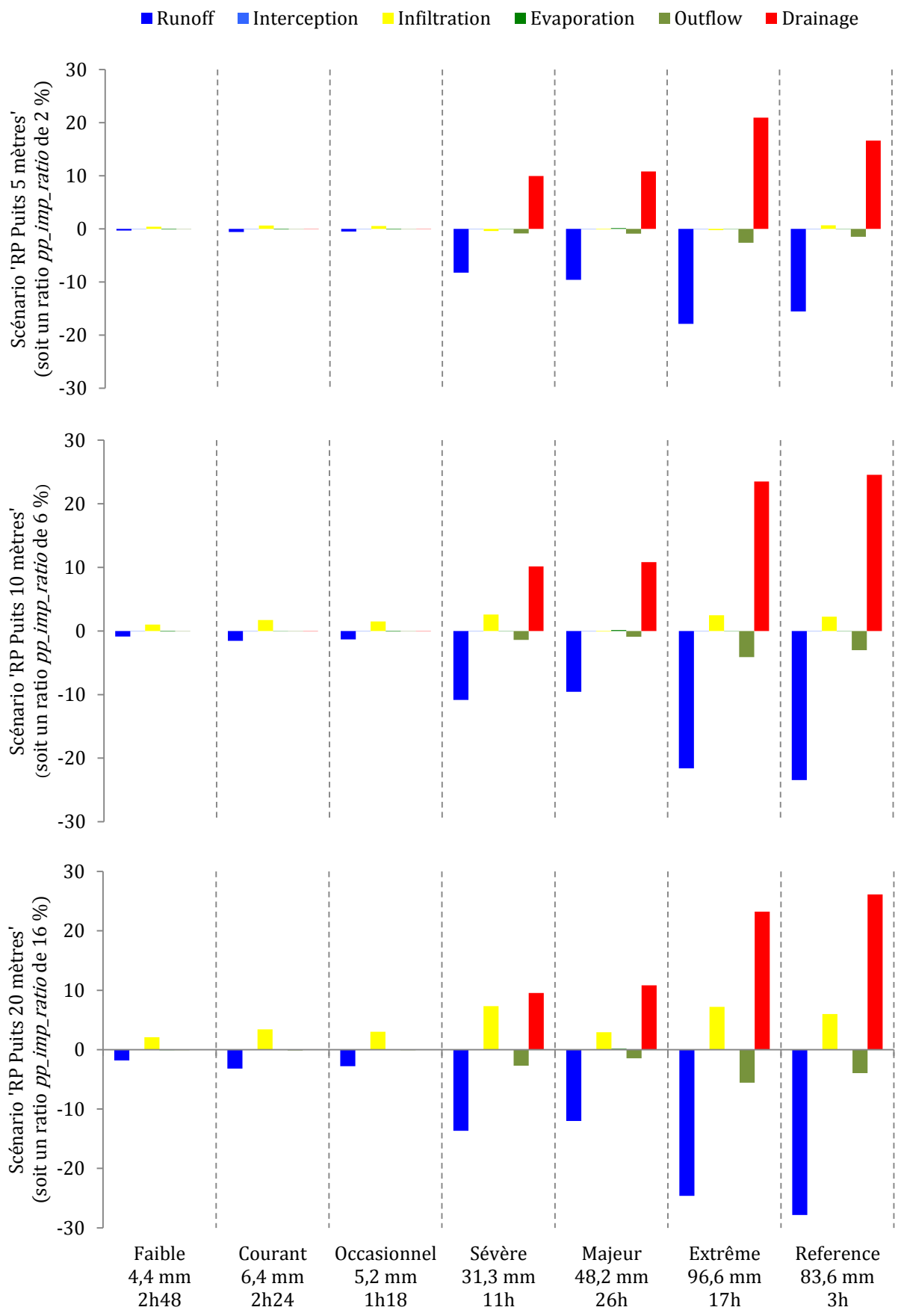


Figure 4.46 – Écarts de volume (exprimés en % du volume de précipitation) des processus hydrologiques entre le scénario de référence et les scénarios 'RP Puits' en fonction de l'événement pluvieux simulé et de la taille d'implantation des revêtements perméables.

Deux ensembles se distinguent sur la Figure 4.46. Les événements pluvieux faibles à occasionnels d'une part, et les événements sévères à extrêmes d'autre part.

- Pour les premiers, l'implantation de revêtements perméables modifie légèrement le bilan hydrologique. Elle se traduit par une diminution du volume de ruissellement (*Runoff*) au profit de l'infiltration. La réduction du ruissellement augmente avec la surface de revêtements perméables implantée :
    - scénario 'RP puits 5 mètres' : ruissellement réduit d'environ 3 % ;
    - scénario 'RP puits 10 mètres' : ruissellement réduit d'environ 9 % ;
    - scénario 'RP puits 20 mètres' : ruissellement réduit d'environ 18 % ;
- Pour les seconds, l'implantation de revêtements perméables entraine une modification importante du bilan hydrologique. Comme observé précédemment pour le scénario 'trottoir', l'utilisation de revêtements perméables réduit fortement le volume de ruissellement, au profit du volume évacué par les RP. Ce volume est majoritairement évacué par le drain en raison de la configuration de ces essais (volume de stockage de 40 litres et perméabilité du sol de 1.10^{-5} m/s) et de la sous-estimation de l'infiltration par *PorousCity*.

  La réduction du ruissellement augmente légèrement avec l'accroissement de la surface de revêtements perméables (diminution de 20 à 40 % du volume de ruissellement avec 2 % de surface perméable, contre une diminution de 30 % à 50 % du volume de ruissellement avec 16 % de surface perméable). Cette réduction du ruissellement est d'autant plus importante que le ruissellement engendré par l'événement pluvieux est important.

  En revanche, l'augmentation de la surface de revêtements perméables permet d'augmenter significativement le volume évacué par infiltration et de diminuer le drainage. En effet, avec 2 % de surface perméable, le volume infiltré est très proche de celui de référence alors qu'il augmente significativement avec 16 % de surface perméable. Cette augmentation de l'infiltration avec la taille de la surface perméable est conforme au résultat attendu. En effet, pour la même surface imperméable drainée, accroitre la taille des zones de RP augmente la surface d'infiltration et le volume de stockage disponible, ce qui retarde le début de drainage et favorise l'infiltration.

En conclusion de ces scénarios, il ressort que pour les événements de période de retour annuelle ou inférieure l'implantation de revêtements perméables permet de réduire légèrement le ruissellement au profit de l'infiltration. Les bénéfices apportés dépendent fortement de la surface de revêtements perméables installée. Pour les événements de période de retour supérieure, l'implantation de surfaces perméables permet de réduire plus significativement le ruissellement. Pour ces événements, augmenter la surface de revêtements perméables influence légèrement la réduction du ruissellement mais permet d'augmenter significativement le volume d'eau évacuée par infiltration et de réduire le drainage.

4.3.4 SCÉNARIOS 'RP BAS ET HAUT'

Ces scénarios visent à approfondir l'étude de l'influence du placement et de la proportion des revêtements perméables sur leurs bénéfices, en s'intéressant notamment à l'altitude de la localisation des revêtements perméables. Dix scénarios sont simulés en faisant varier le ratio de surface perméable sur surface imperméable (*pp_imp_ratio*) (5, 10, 15, 20 et 30 %) et la règle de

localisation relative à l'altitude (en priorité les points hauts ou en priorité les points bas). Pour ces dix scénarios, les revêtements perméables sont implantés sur les routes.

La Figure 4.47 présente la localisation des revêtements perméables (en violet) implantés en points hauts ou en points bas du bassin versant avec un ratio de surface de revêtements perméables sur la surface imperméable de 10 % ou de 20 %.

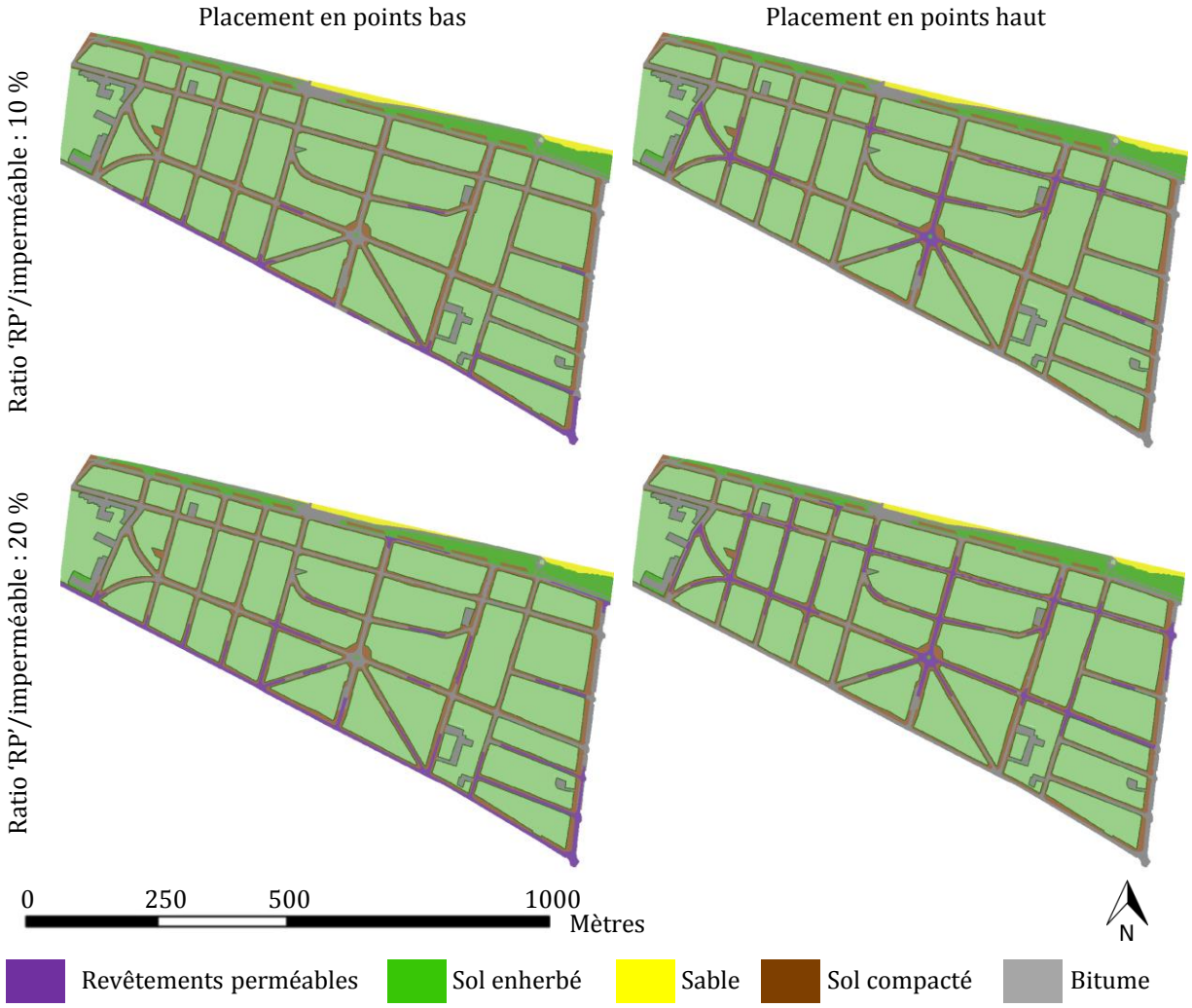


Figure 4.47 – Cartographie de l'implantation des revêtements perméables pour le scénario 'RP bas et haut' en fonction du ratio de surface perméable et de la règle de localisation en fonction de l'altitude.

Les résultats obtenus pour ces dix scénarios sont comparés sur la Figure 4.48 en fonction du volume de ruissellement.

Contrairement au résultat logiquement attendu qui serait de privilégier les points bas, les résultats de la Figure 4.48 ne permettent pas de mettre en évidence un positionnement à privilégier entre la règle de placement en points bas ou en points hauts du bassin versant. Sans que cela soit significatif, il est possible d'observer que :

- le placement en points hauts est légèrement plus favorable pour un ratio de 10 ou 15 % de surface de RP par rapport à la surface imperméable ;
- le placement en points bas est légèrement plus favorable pour un ratio de 20 ou 30 % de surface de RP par rapport à la surface imperméable.

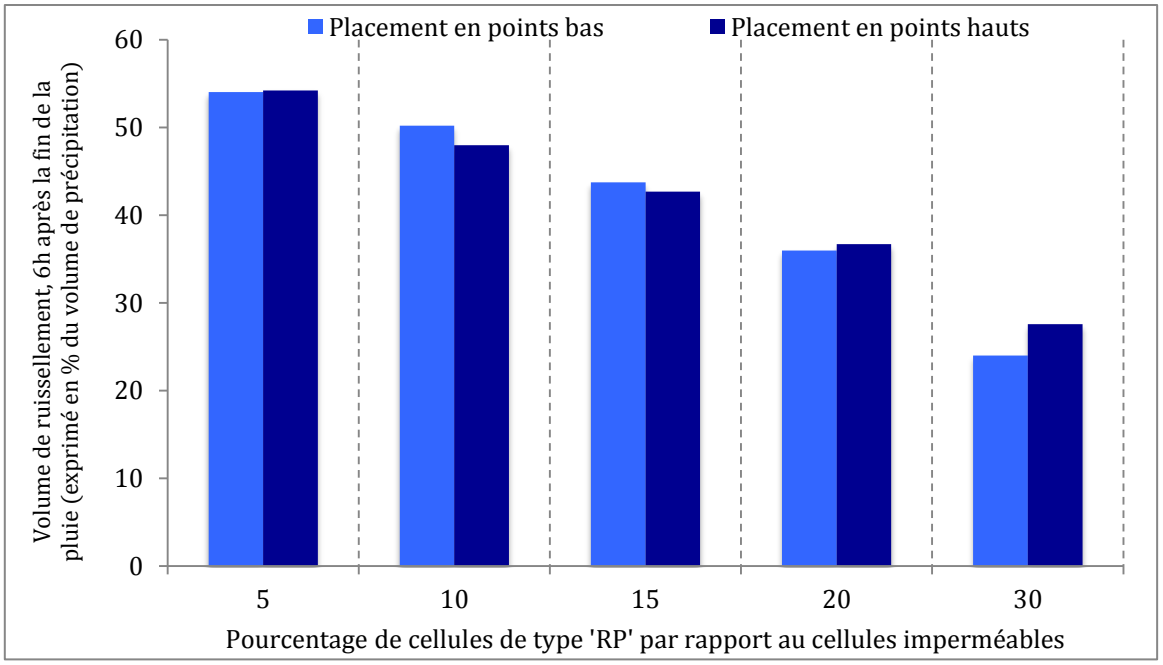


Figure 4.48 – Comparaison des volumes de ruissellement 6 heures après la pluie pour l'ensemble des simulations des scénarios 'RP bas et haut' en fonction du ratio de surface perméable et de la règle de placement (points bas/haut).

À partir de la Figure 4.47 présentant la localisation des revêtements perméables pour les scénarios correspondant aux ratios de 10 et 20 %, il est possible d'observer qu'avec un ratio de 10 %, la règle de placement en partant des points hauts conduit à une répartition plus éclatée des revêtements perméable, au contraire l'implantation en partant des points bas entraine une implantation quasiment entièrement concentré le long de la route de Lion (bordure sud du bassin versant). Cette différence de répartition est moins marquée avec un ratio de 20 %.

Ces résultats soulignent l'importance de la dispersion des zones d'implantation des revêtements perméables. Cet aspect est approfondi par la suite en définissant un indicateur de dispersion (4.3.5). Concernant l'altitude à privilégier, il semble possible d'extrapoler à partir de ces résultats qu'à répartition similaire (nombre et espacement des zones d'implantation) le placement sur les points bas du bassin versant est plus avantageux. Cependant, cette observation n'est valable que pour ce bassin versant donné.

4.3.5 Influence du placement des revêtements perméables

4.3.5.1 Présentation des simulations de localisation des RP

Pour étudier l'influence du placement des revêtements perméables sur leurs bénéfices un plan d'expérience de 20 simulations a été conduit. Les variables *pp_imp_ratio* (ratio de surface de RP sur la surface imperméable) et *pp_size* (taille d'une zone de revêtements perméables) sont utilisés comme variables explicatives, les valeurs testées sont présentées dans le Tableau 4.14.

Tableau 4.14 – Valeurs données aux variables *pp_imp_ratio* et *pp_size* pour construire le plan d'expérience d'étude de l'influence du placement des revêtements perméables.

pp_imp_ratio	*pp_size*
5 ; 10 ; 15 ; 20 et 30 %	5 ; 10 ; 20 et 50 m

Le placement des zones perméables se fait exclusivement sur les routes et aucune règle relative à l'altitude n'est utilisée. Aussi, l'implantation des zones de RP comprend une part d'aléatoire.

Les résultats des scénarios précédents ('Puits', 'Haut et bas', et 'Trottoir RP') sont ajoutés aux résultats des 20 simulations du plan d'expérience. Les bilans hydrologiques de l'ensemble de ces simulations sont comparés entre eux en utilisant différents indicateurs de placement comme variables explicatives (Tableau 4.15) :

- (a) le ratio 'surface de RP' sur 'surface imperméable' (ratio) ;
- (b) la surface d'implantation d'une zone de 'RP' (surface) ;
- (c) le nombre d'implantations de zone de 'RP' (nombre).

Le nombre d'implantations de zone de 'RP' est utilisé pour donner un indicateur de dispersion des surfaces perméables. Il est calculé à partir du nombre total de cellule de type 'RP' divisé par la surface d'implantation d'une zone de 'RP'. Cet indicateur a l'avantage d'être facilement calculé mais il est imparfait. D'une part, cet indicateur ne rend pas compte du nombre exact de structures perméables. En effet, des zones peuvent être implantées de façon adjacente lors de la génération des 'RP' et ne former ainsi qu'une seule structure perméable. D'autre part, cet indicateur ne permet pas de rendre compte fidèlement de la dispersion des zones perméables du scénario 'Trottoir RP' ou des scénarios 'Haut et bas' pour lesquels les revêtements sont implantés de façon continue.

Tableau 4.15 – Bilan hydrologique (variables descriptives) et valeurs des indicateurs (variables explicatives) des simulations considérées pour l'étude de l'influence du placement des revêtements perméables.

	Ratio	Surface	Nombre	Runoff	Interception	Infiltration	Evaporation	Outflow	PP_Infiltration	PP_Drain
	%	*m²*		*% du total de précipitation*						
Plan d'expérience sur la localisation	0	0	0	59	6	20	2	12	0	0
	5	50	114	29	5	18	2	6	5	35
	5	100	57	38	5	19	2	8	4	23
	5	200	28	42	5	18	2	9	4	19
	5	500	12	50	5	19	2	10	3	11
	10	50	217	19	5	16	2	3	8	47
	10	100	109	24	5	18	2	6	7	38
	10	200	55	35	5	19	2	7	7	25
	10	500	22	39	5	18	2	10	7	19
	15	50	311	15	5	16	2	3	10	49
	15	100	156	21	5	17	2	3	10	42
	15	200	78	28	5	18	2	5	9	32
	15	500	31	33	5	18	2	6	9	26
	20	50	398	14	5	15	2	2	12	49
	20	100	199	17	5	16	2	3	12	45
	20	200	99	19	5	16	2	5	12	40
	20	500	40	30	5	18	2	4	12	30
	30	50	551	12	5	15	2	1	16	48
	30	100	276	13	5	15	2	2	16	46
	30	200	138	18	5	16	2	2	16	40
	30	500	55	21	5	16	2	3	16	37
Puits	2	50	46	43	6	19	2	11	3	17
	6	100	66	35	5	19	2	9	4	25
	16	200	81	31	5	19	2	8	9	26
Haut et bas	5	500	12	54	5	20	2	8	4	7
	5	500	11	54	5	20	2	12	3	3
	10	500	22	50	5	20	2	4	7	12
	10	500	22	48	5	20	2	12	6	7
	15	500	31	44	5	20	2	2	10	17
	15	500	31	43	5	20	2	11	9	11
	20	500	40	36	5	18	2	2	13	24
	20	500	40	37	5	19	2	11	11	15
	30	500	55	24	5	16	2	1	17	34
	30	500	55	28	5	18	2	10	15	22
*	66			5	4	16	2	5	20	48

*Scénario trottoir 'RP'

4.3.5.2 INFLUENCE DE LA LOCALISATION DES RP SUR LE RUISSELLEMENT DE SURFACE

Les résultats de chaque simulation sont tracés en fonction de chaque indicateur (Figure 4.49).

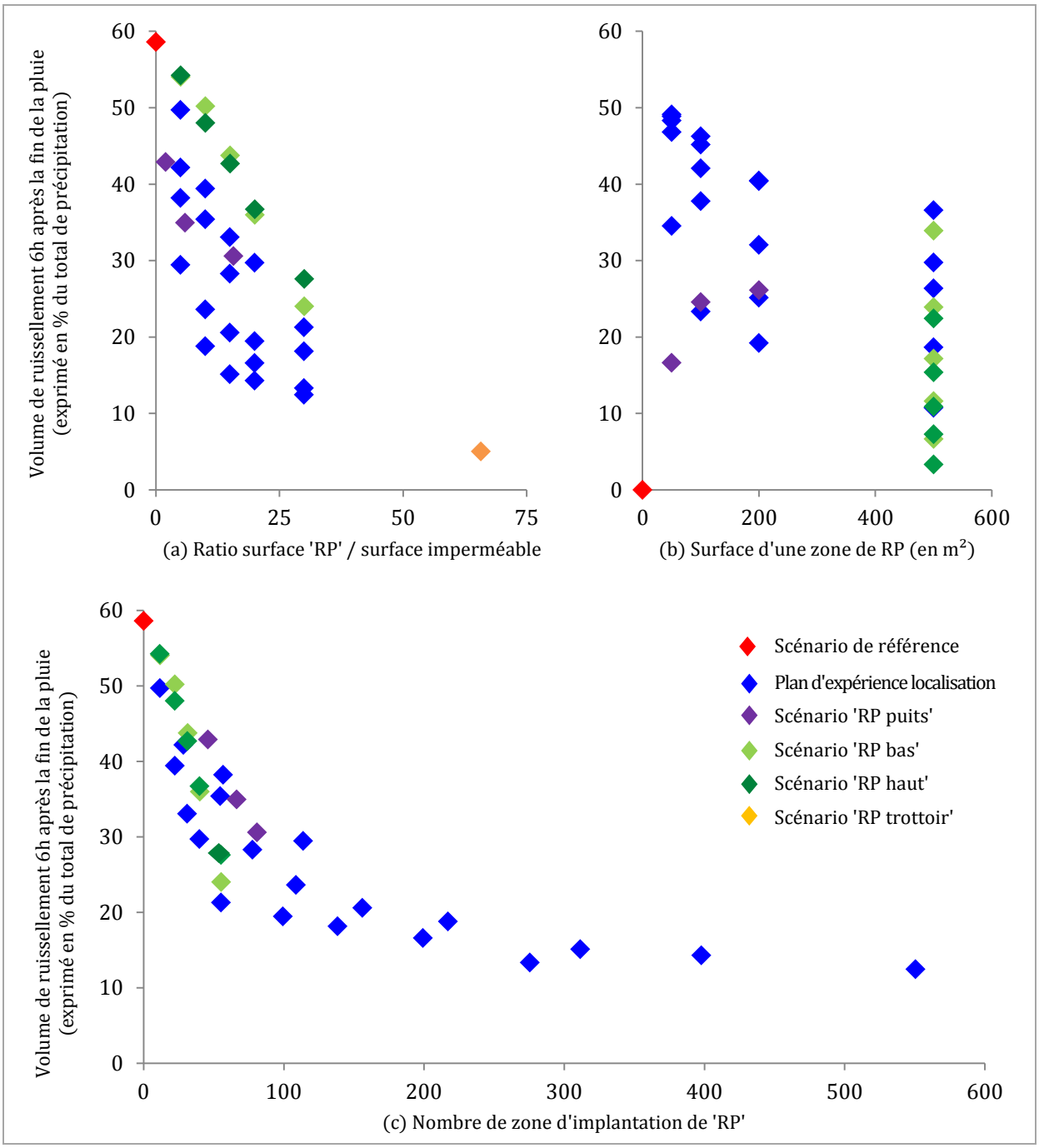


Figure 4.49 – Volume de ruissellement des scénarios d'étude de l'influence de la localisation tracés en fonction de chacun des indicateurs : (a) ratio de surface RP/surface imperméable, (b) taille des zones d'implantation de RP, (c) nombre de zone d'implantation de RP.

Ces représentations permettent d'étudier la variation de bénéfices des revêtements perméables en fonction de chacun des indicateurs :

- (a) le volume de ruissellement diminue logiquement quand le ratio de surface de revêtements perméables sur la surface imperméable augmente mais sans qu'une corrélation nette puisse être établie. En effet, pour un même ratio, le volume de ruissellement peut varier fortement ;

- (b) aucune corrélation ne peut être mise en évidence entre la taille des zones d'implantation et le volume de ruissellement ;
- (c) les résultats obtenus pour le volume de ruissellement présentent une corrélation assez nette avec le nombre de zones d'implantation. En effet, la Figure 4.49 (c) montre une décroissance de type exponentielle du ruissellement avec le nombre de zones d'implantation.

Ces représentations des résultats mettent en évidence que, malgré ses imperfections, le nombre de zones d'implantation de revêtements perméables est l'indicateur qui explique le mieux la variation du ruissellement d'une simulation à une autre. Cette observation souligne l'importance de la dispersion des structures à revêtements perméables sur leur efficacité.

La mise en évidence des différents scénarios sur la Figure 4.49 (a) permet également de comparer les choix de placement de ces scénarios. À ratio de surface de revêtements perméables équivalent, les scénarios 'RP bas' et 'RP haut' présentent systématiquement des résultats moins bons que la moyenne ce qui souligne l'absence de pertinence de concentrer les zones perméables. Les résultats du scénario 'RP puits' sont approximativement dans la moyenne de l'ensemble des simulations, et ils ne ressortent donc pas comme particulièrement plus pertinents en comparaison à une implantation aléatoire. Enfin, à noter que le scénario 'RP trottoir' présente, de loin, les meilleurs résultats mais avec un ratio *pp_imp_ratio* bien supérieur.

4.3.5.3 INFLUENCE DE LA LOCALISATION DES RP SUR LEUR PROCESSUS HYDROLOGIQUES

Le même raisonnement, étude des résultats en fonction des trois indicateurs, est ensuite appliqué aux volumes stocké, infiltré et drainé par les revêtements perméables. Aucune corrélation nette ne peut être établie avec la taille de la zone d'implantation, aussi, seuls les deux autres indicateurs sont conservés. Les résultats sont présentés sur les figures 4.50, 4.51 et 4.52.

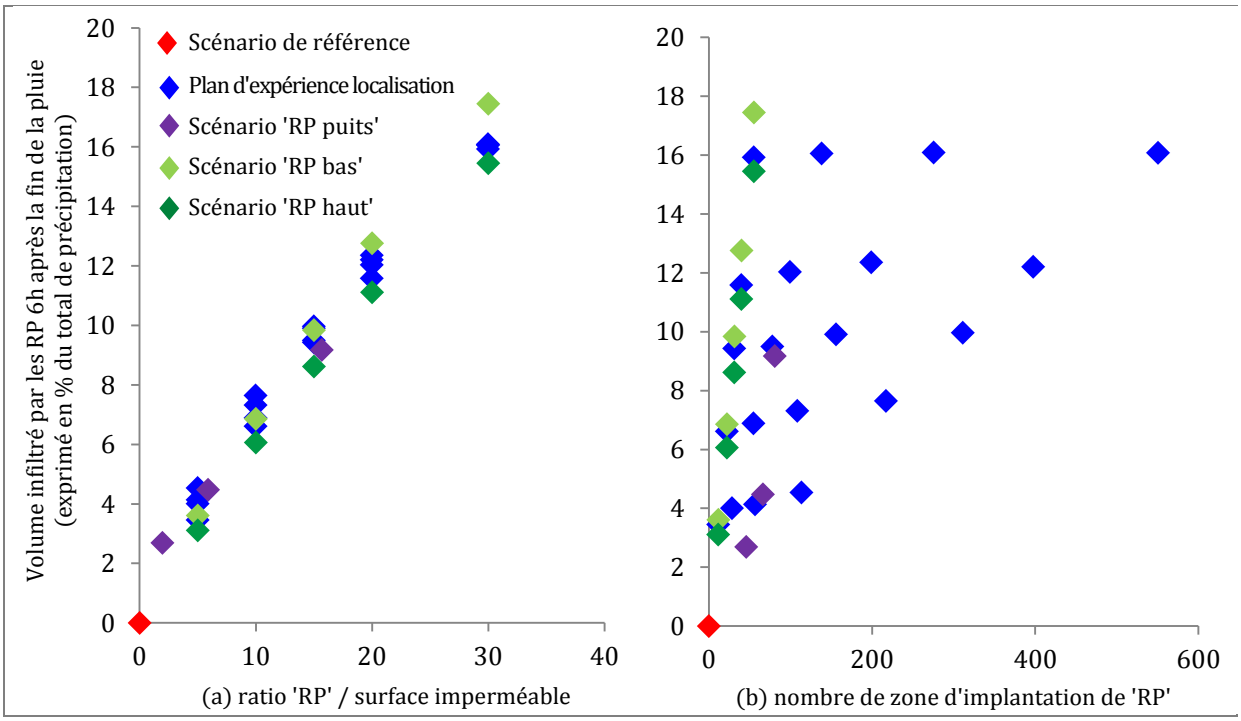


Figure 4.50 – Résultats de volume total infiltré par les revêtements perméables pour les différents scénarios de localisation tracés en fonction : (a) du ratio de surface RP sur la surface imperméable, (b) du nombre de zone d'implantation de RP.

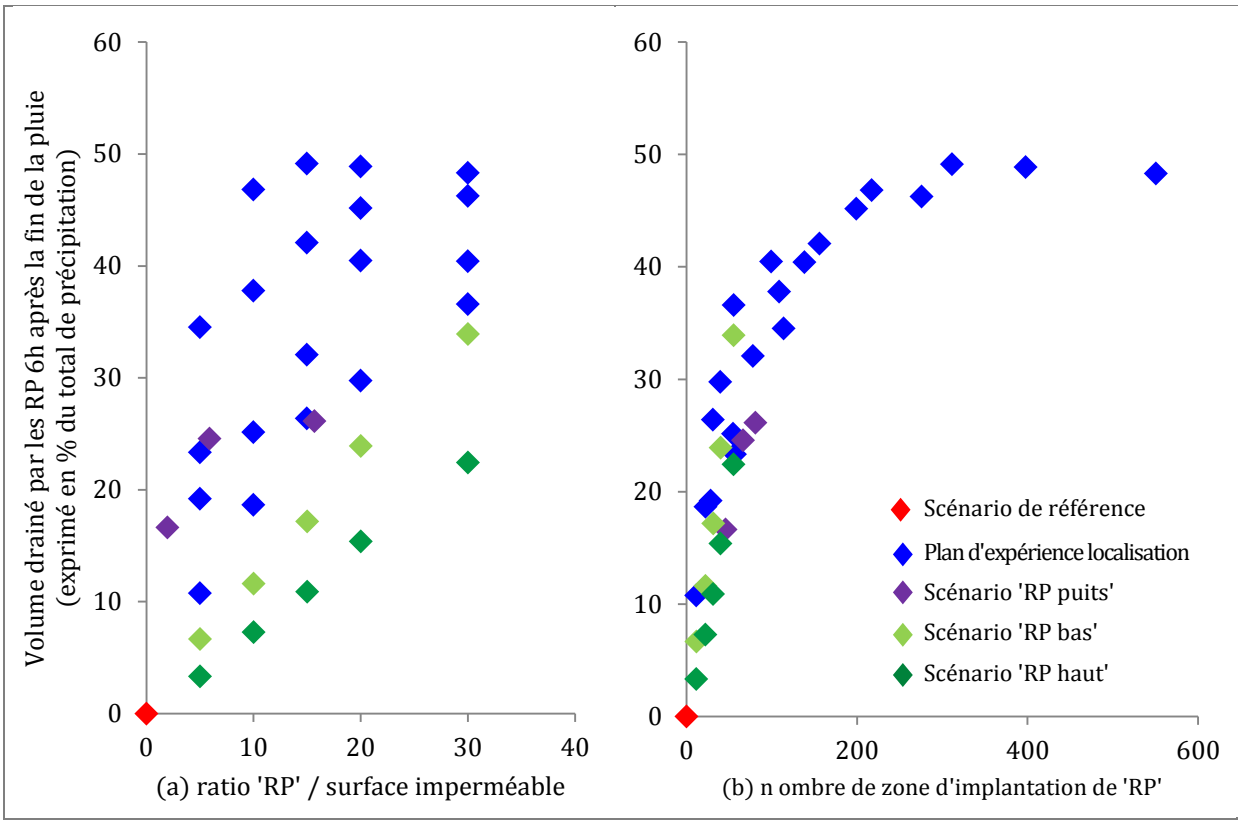


Figure 4.51 – Résultats de volume total drainé par les revêtements perméables pour les différents scénarios de localisation tracés en fonction : (a) du ratio de surface RP sur la surface imperméable, (b) du nombre de zone d'implantation de RP.

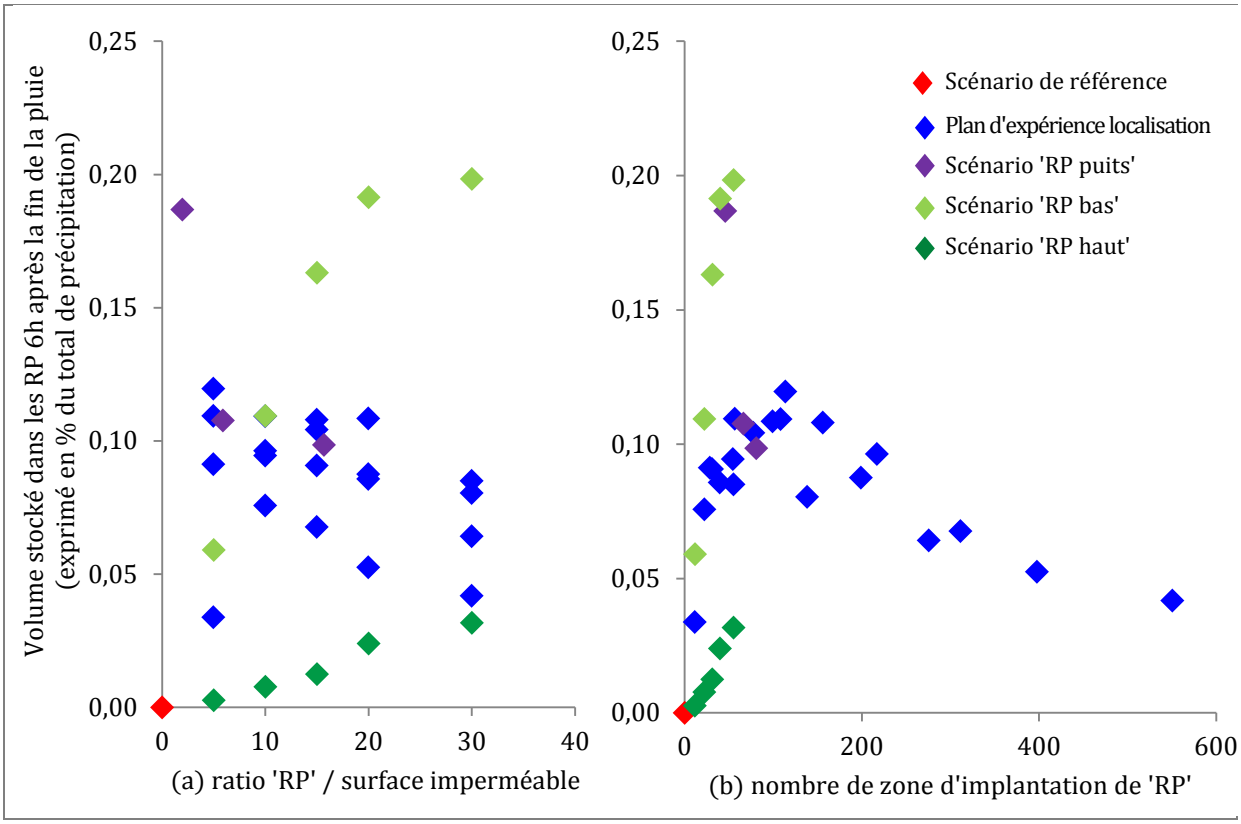


Figure 4.52 - Résultats de volume total stocké dans la fondation des revêtements perméables pour les différents scénarios de localisation tracés en fonction : (a) du ratio de surface RP sur la surface imperméable, (b) du nombre de zone d'implantation de RP.

Ces représentations des résultats permettent d'approfondir la compréhension de l'influence de la localisation des structures à revêtements perméables sur leurs bénéfices.

- **en s'intéressant à l'ensemble des simulations**, le ratio de surface de RP sur la surface imperméable explique très bien les variations de volume total infiltré par les RP. Le volume infiltré augmente proportionnellement avec le ratio de surface. En revanche, c'est le nombre de zones d'implantation qui explique le mieux les variations du volume drainé et du volume stocké par les RP. Le volume drainé augmente de façon logarithmique avec le nombre de zones. Le volume stocké quant à lui semble présenter un maximum qui délimite deux tendances : une croissance rapide jusqu'à un nombre de zones pour lequel le stockage est maximum puis une décroissance.

  Ces résultats montrent que l'infiltration dépend de la surface de revêtements déployée mais pas directement de la localisation de l'implantation de ces revêtements. Cette observation est valable avec une perméabilité de sol homogène sur l'ensemble du bassin versant et une pluie importante qui entraine une percolation de l'eau sur l'ensemble des RP indépendante de leur localisation.

  En revanche, le volume drainé dépend lui directement de la façon dont les revêtements sont implantés ; moins ils sont dispersés (autrement dit, à ratio de surface équivalent, plus la taille des zones d'implantation est importante) moins le drainage est important. Cette observation s'explique par la diminution du volume de stockage disponible pour une zone de RP avec l'augmentation de leur nombre (leur dispersion).

  Enfin, la variation du volume stocké semble montrer qu'un nombre d'implantations (une dispersion) optimum existe pour maximiser le stockage dans les structures. Une telle dispersion permettrait alors de trouver un compromis entre la réduction du ruissellement et la limitation de drainage ;

- **pour les scénarios 'RP bas' et 'RP haut'**, une tendance nette se dégage entre les deux règles de localisation sur les trois indicateurs. En effet, les volumes infiltré, drainé et stocké sont systématiquement plus importants pour les scénarios 'RP bas'.

  Ces résultats soulignent que la localisation des RP dans les zones basses du bassin versant favorise le ruissellement de l'eau vers ces dernières et donc permet d'augmenter le volume évacué par les RP.

  Le fait que le stockage soit largement favorisé dans les scénarios 'RP bas' (avec des volumes atteints bien supérieurs aux autres simulations) s'explique par le fait que les RP situés dans les points bas continuent de recevoir le ruissellement de surface après la fin de la pluie ce qui ralentit la vidange du volume stocké dans leur fondation.

4.3.5.4 CONCLUSION SUR L'INFLUENCE DE LA LOCALISATION DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Les résultats obtenus font ressortir que la dispersion des structures perméables est le premier indicateur à suivre pour optimiser leurs bénéfices. En effet, à surface de RP constante, augmenter leur dispersion permet d'améliorer la réduction du volume de ruissellement.

En prenant en compte le devenir de l'eau absorbé par les RP, il apparait qu'un optimum de dispersion existe pour limiter le volume drainé en favorisant le stockage dans la fondation des structures perméables. Au regard des résultats obtenus, il semble que cet optimum soit atteint quand l'indicateur de zone d'implantation est entre 200 et 250. Cependant cette valeur n'a pas

vraiment de sens physique. Il serait nécessaire de développer un « vrai » indicateur de dispersion des RP pour confirmer et approfondir ces observations. L'idéal serait de pouvoir mesurer la surface imperméable drainée pour chaque zone de revêtements perméables et de faire un ratio entre cette surface drainée et la surface de la zone perméable.

Dans le cas présent seule la surface moyenne drainée par zone peut être connue (Surface imperméable totale / nombre de zone), ce qui permet de calculer un indicateur de surface drainé moyenne par la surface d'une zone perméable. Pour aller plus loin, il faudrait connaitre la répartition de ces surfaces ; une répartition resserrée signifierait une bonne dispersion des RP et une répartition large témoignerait d'une dispersion non optimisée (Figure 4.53).

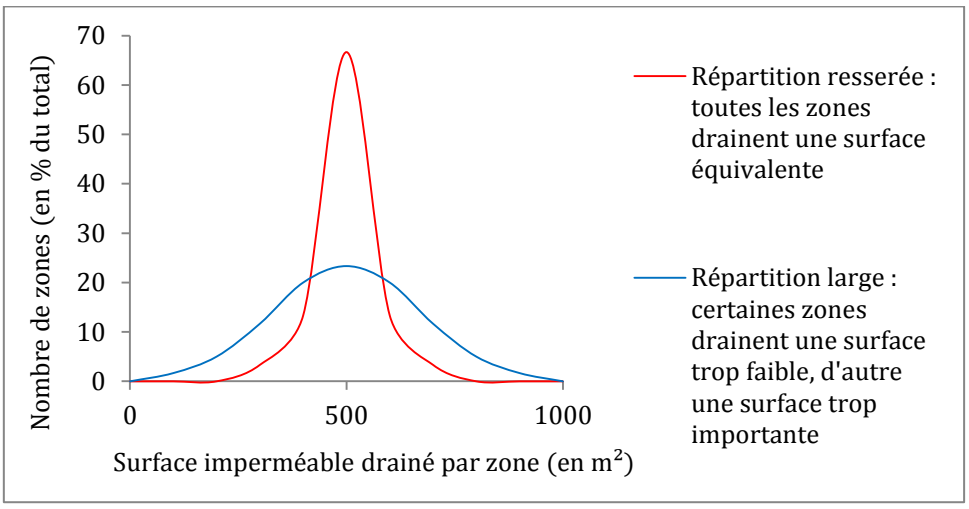


Figure 4.53 – Illustration de la répartition possibles du nombre de zones perméables en fonction de la surface imperméable drainée.

Par ailleurs, les résultats montrent que l'implantation des RP dans les points bas favorise l'écoulement de l'eau vers ces structures et donc augmente le volume qu'ils évacuent. Cependant cela ne s'accompagne pas systématiquement d'une diminution du volume de ruissellement comme cela avait été souligné précédemment (4.3.4). L'analyse présentée gagnerait également à être approfondie avec de nouveaux scénarios d'implantations et une exploitation plus poussée des résultats.

4.3.6 Influence des propriétés des revêtements perméables

4.3.6.1 Présentation des simulations sur les propriétés des revêtements perméables

Pour terminer l'analyse de l'implantation de revêtements perméables cette dernière sous-section porte sur l'exploration de l'influence des propriétés des revêtements perméables :

- le volume de stockage maximum par rétention (*PP_ interception*). Cette valeur dépend des matériaux utilisés pour la couche drainante en surface et du lit de pose. Pour cette analyse elle est prise entre 5 mm et 10 mm ;
- le volume de stockage maximum dans la fondation (*PP_max_storage*). Cette valeur dépend directement de la position du drain dans la couche de fondation. Elle est prise entre 40 litres (drain situé à 10 cm du fond) et 160 litres (drain situé à 40 cm du fond de la structure) ;

- le flux d'eau maximum entrant dans la structure (*PP_Flow_in*). Cette valeur dépend à la fois de la couche drainante de surface et de son état de colmatage. Elle est prise entre 60 L/min (soit une perméabilité de 1 mm/s) et 6 L/min (soit une perméabilité de 0,1 mm/s). Ces deux valeurs correspondent à la perméabilité du béton drainant coquillé non colmaté (60 L/min) et à sa perméabilité résiduelle après une série de colmatages/nettoyage des pavés (Annexe B)

Les valeurs données à ces trois variables sont présentées dans le Tableau 4.16. Le plan d'expérience suivi teste toutes les combinaisons possibles entre ces valeurs, soit 16 simulations. Ces simulations sont conduites pour la pluie de référence avec une implantation des revêtements perméables correspondant à celle du scénario 'Puits 10 mètres'.

Tableau 4.16 - Valeurs données aux variables *pp _interception*, *PP_max_storage* et *PP_Flow_in* pour construire le plan d'expérience d'étude de l'influence des propriétés des revêtements perméables.

pp _interception	*PP_max_storage*	*PP_Flow_in*
5 et 10 mm	40 ; 80 ; 120 ; et 160 litres	6 et 60 L/min

4.3.6.2 RÉSULTATS DES SIMULATIONS SUR LES PROPRIÉTÉS DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Les résultats du plan d'expérience suivi sont présentés dans le Tableau 4.17. Les résultats obtenus présentent des variations relativement faibles d'une simulation à l'autre témoignant de l'influence limitée de ces trois variables explicatives sur les bénéfices des revêtements perméables.

Tableau 4.17 - Bilan hydrologique (variables descriptives) et valeur des indicateurs (variables explicatives) des simulations du plan d'expérience portant sur les propriétés des revêtements perméables.

PP_interception	PP_max_storage	PP_flow_in	Runoff	Interception	Infiltration	Evaporation	PP_Infiltration	PP_Drain
L/m²	*L/m²*	*L/min/m²*	*% volume total de précipitation*					
5	40	6	36,8	5,3	18,9	1,8	5,7	21,7
5	40	60	35,5	5,3	18,6	1,8	4,6	24,9
5	80	6	36,9	5,3	18,8	1,8	7,8	19,7
5	80	60	35,4	5,3	18,6	1,8	6,2	23,3
5	120	6	36,8	5,3	18,9	1,8	9,5	18,0
5	120	60	35,4	5,3	18,7	1,8	7,4	22,1
5	160	6	36,9	5,3	18,9	1,8	10,9	16,6
5	160	60	35,4	5,3	18,7	1,8	8,3	21,2
10	40	6	36,8	5,4	18,9	1,9	5,8	21,6
10	40	60	35,4	5,3	18,6	1,9	4,7	24,8
10	80	6	36,9	5,4	18,9	1,9	7,8	19,6
10	80	60	35,4	5,3	18,7	1,9	6,2	23,2
10	120	6	36,9	5,4	18,9	1,9	9,4	17,9
10	120	60	35,4	5,3	18,7	1,9	7,3	22,1
10	160	6	36,9	5,4	18,9	1,9	10,8	16,5
10	160	60	35,4	5,3	18,7	1,9	8,2	21,2

Pour étudier l'influence des trois variables sur les bénéfices des revêtements perméables une analyse par régression linéaire multiple a été conduite entre les trois variables explicatives (*pp_interception*, *PP_max_storage* et *PP_Flow_in*) et les volumes de ruissellement, d'interception, d'évaporation, d'infiltration par les RP et de drainage par les RP. Les coefficients normalisés sont présentés sur la Figure 4.54. Le Tableau 4.18 donne la valeur de R^2 et de la probabilité critique associée à F pour chacun des indicateurs de processus hydrologique.

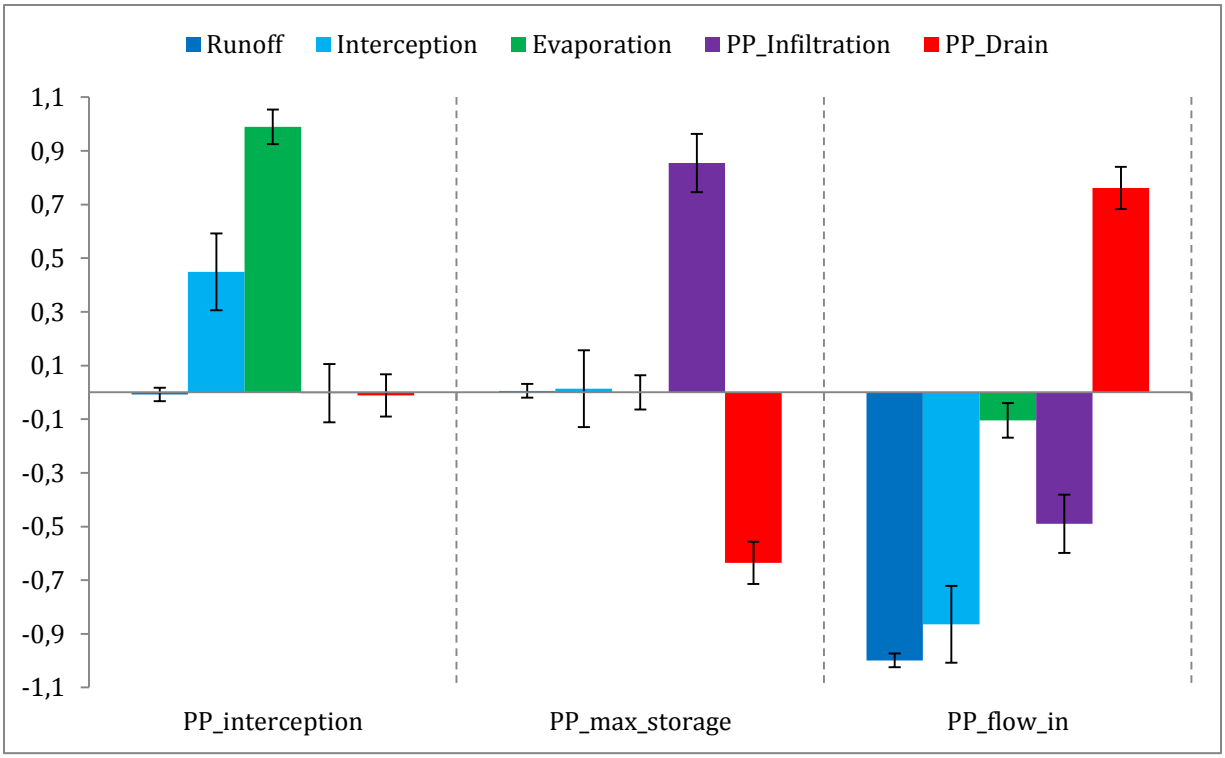


Figure 4.54 – Coefficients normalisés de l'analyse de régression linéaire portant sur les volumes de ruissellement, d'interception, d'évaporation, d'infiltration par les RP et de drainage par les RP en fonction des valeurs des propriétés des RP (maximum d'interception, maximum de stockage et perméabilité de surface).

Tableau 4.18 - Synthèse des critères de corrélation de la régression linéaire sur les résultats du plan d'expérience portant sur les propriétés des revêtements perméables.

	Runoff	**Interception**	**Evaporation**	**PP_Infiltration**	**PP_Drain**
R^2	0,99	0,95	0,99	0,97	0,98
Pr > F	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$	$< 1{\cdot}10^{-4}$

Ces résultats permettent de décrire l'influence de ces trois variables :

- le volume maximum d'interception (*PP_interception*) influence seulement le volume d'interception et d'évaporation. Une augmentation du réservoir d'interception se traduit logiquement par une augmentation de l'interception et également par une augmentation de l'évaporation qui bénéficie d'un volume d'eau à évaporer plus important ;
- le volume maximum de stockage (*PP_max_storage*), ou autrement dit la hauteur du drain dans la structure, influence seulement les volumes infiltrés et drainés par les RP. Logiquement, et comme cela a déjà été observé au chapitre 3, une augmentation du réservoir de stockage dans la fondation conduit à favoriser l'infiltration au détriment du drainage, et inversement ;
- la perméabilité de surface (*PP_flow_in*) influence l'ensemble des volumes étudiés. De façon prévisible augmenter la perméabilité de surface permet d'accroitre le débit d'eau absorbé par les RP et donc diminue le ruissellement de surface. En contrepartie l'augmentation du débit entrant dans les RP s'accompagne d'une diminution du volume infiltré au profit de l'augmentation du volume drainé. Enfin, l'augmentation de la perméabilité de surface entraine également des résultats moins intuitifs : la diminution du volume intercepté et une très légère diminution du volume évaporé.

Ces résultats montrent l'influence de la valeur de perméabilité de surface sur les bénéfices des revêtements perméables, notamment sur la réduction du ruissellement. La Figure 4.55 détaille cette influence et permet de quantifier que le passage d'une perméabilité de surface de 60 litres/minute à 6 litres/minute (due au colmatage par exemple) entraine une augmentation de 4 % du volume de ruissellement de surface. Cette faible augmentation du volume de ruissellement souligne que, dans le cas du bassin versant et de l'événement pluvieux étudiés, une perméabilité de surface de 6 litres/minute reste suffisante pour absorber le ruissellement de surface.

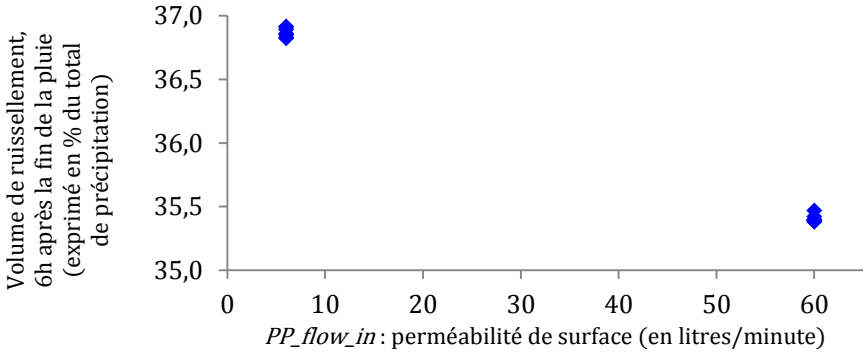


Figure 4.55 – Volume de ruissellement en fonction de la valeur de perméabilité de surface

Ces résultats soulèvent également la question de la réalité physique de la variable *PP_flow_in*. En effet, son influence sur les processus hydrologiques au sein des structures à revêtements perméables est très proche de l'influence de la valeur de perméabilité de la couche de fondation observé au chapitre 3. La variable *PP_flow_in* peut ainsi être vue comme une estimation de la vitesse d'écoulement entre la surface et la fondation et non juste comme une valeur liée à la perméabilité de surface.

4.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 4 ET DISCUSSIONS

Ce chapitre montre qu'il est possible d'étudier l'influence de la mise en œuvre de structures à revêtements perméables sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant à partir d'une approche multi-agents. Cette approche conceptuelle permet d'obtenir des résultats proches de ceux obtenus précédemment avec le modèle *PermetAble* (basé sur une approche physique), tout en passant de l'échelle de la structure à celle du bassin versant et en réduisant la durée et le besoin en données d'entrée de modélisation.

Cette synthèse revient, dans un premier temps, sur les principaux enseignements qui peuvent être tirés de l'exploration du modèle *PorousCity*. Dans un second temps, la pertinence de l'utilisation des systèmes multi-agents dans le cadre du modèle *PorousCity* et pour la modélisation en hydrologie urbaine de façon plus générale est discutée.

4.4.1 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS PRINCIPAUX

L'exploration du modèle *PorousCity* présenté dans ce chapitre apporte certains éléments de réponses aux objectifs de départ de ce travail de thèse, concernant la quantification des bénéfices des revêtements perméables et la mise en évidence de « bonnes pratiques » pour optimiser leur implantation.

4.4.1.1 BONNES PRATIQUES D'IMPLANTATION DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Concernant l'objectif de mise en évidence de « bonnes pratiques », les résultats obtenus soulignent l'importance de la dispersion des structures à revêtements perméables pour optimiser leurs bénéfices à l'échelle du bassin versant. En effet, l'analyse de l'influence du placement des revêtements perméables a montré que c'est cet indicateur qui influence le plus les différents bénéfices attendus : réduire le ruissellement de surface, favoriser l'évaporation et l'infiltration et limiter le volume évacué par drainage. Plus précisément, en croisant l'influence de la dispersion des zones de revêtements perméables sur les différents bénéfices attendus, un niveau de dispersion optimal semble pouvoir être mis en évidence. Pour approfondir cette observation des indicateurs de dispersion plus pertinents seraient nécessaires. Ici seule la surface imperméable moyenne drainée par zone de revêtements perméables peut être calculée.

La Figure 4.56 illustre l'utilisation de cet indicateur. Les volumes de ruissellement de surface, et les volumes infiltré, drainé et stocké par les revêtements perméables sont tracés en fonction de la surface imperméable moyenne drainée par zone de revêtements perméables. Il apparait alors, graphiquement, qu'une surface entre 1000 et 2000 m^2 est la plus optimale pour minimiser le ruissellement et le drainage et maximiser l'infiltration et le stockage.

Cette observation est à prendre avec précautions. En effet, elle serait à confirmer pour différents bassins versants et avec l'utilisation d'un indicateur plus représentatif de la dispersion réelle des structures perméables. Elle permet ici surtout de mettre en évidence qu'un projet d'implantation de revêtements perméables doit être vigilant à :

- ne pas trop concentrer les surfaces perméables, au risque de diminuer leur influence sur le ruissellement ;
- et ne pas prévoir l'implantation de zones trop petites, au risque de saturer trop vite leur réservoir de stockage et d'évacuer une part trop importante de l'eau par le drain.

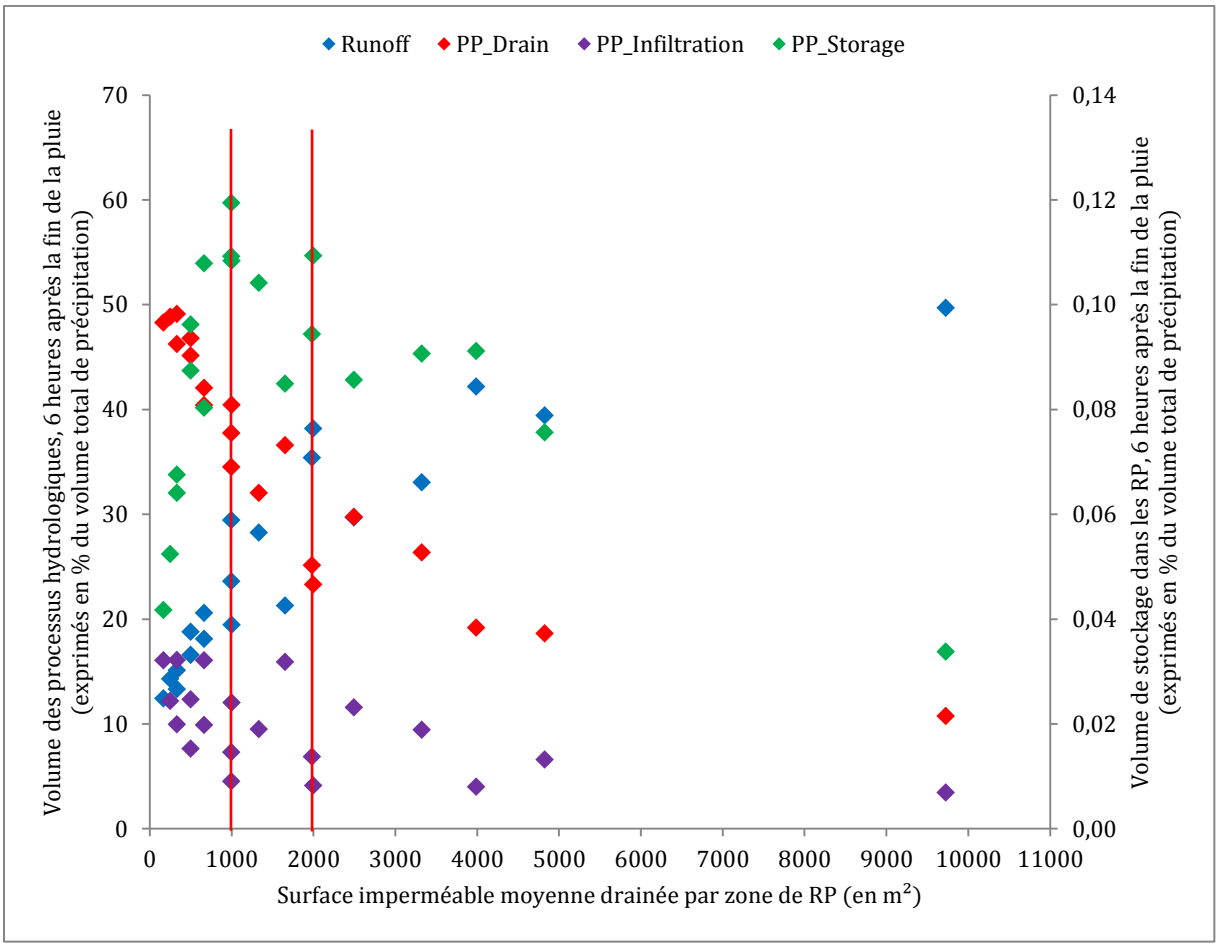


Figure 4.56 – Volumes de ruissellement de surface, et volumes infiltré, drainé et stocké par les revêtements perméables, tracés en fonction de la valeur du ratio dit de « dispersion » : *pp_imp_ratio / pp_size*

Les résultats des différents scénarios explorés permettent également de confirmer des règles de « bon sens » :

- il est préférable de privilégier les points bas des écoulements pour implanter les revêtements perméables, dans la mesure où cette règle d'implantation n'entraine pas une trop forte concentration de ces structures. En effet les résultats obtenus montrent que le placement sur les points bas permet d'augmenter le volume de ruissellement absorbé par les revêtements perméables. En revanche, ils soulignent que cette augmentation ne se traduit pas par une baisse significative du ruissellement si les revêtements sont trop concentrés ;
- comme cela avait été souligné au chapitre 3 d'une part, augmenter le réservoir de stockage dans la couche de fondation permet de favoriser l'infiltration et de diminuer le drainage, et d'autre part, augmenter le réservoir de stockage par rétention en surface permet de favoriser l'interception et l'évaporation. Ces résultats confirment tout l'intérêt de chercher à augmenter la capacité de rétention d'eau du matériau de la couche de surface et de placer le drain le plus haut possible dans la structure (dans la limite des enjeux de stabilité et de temps de vidange).

4.4.1.2 QUANTIFICATION DES BÉNÉFICES DES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Concernant l'objectif de quantification, les résultats présentés dans ce chapitre ne donnent pas de réponse absolue sur les bénéfices des revêtements perméables. Plusieurs aspects limitent en effet la quantification des impacts de ces structures, notamment :

- **le modèle lui-même**. Comme cela a été souligné dans la section sur la vérification du modèle *PorousCity*, cet outil ne permet pas de quantifier le comportement réel d'un bassin versant. Il permet de donner un ordre de grandeur des processus et surtout de comparer des scénarios d'aménagement différents. Mais il n'est pas adapté pour dimensionner une structure ou un aménagement ni déterminer précisément la hauteur de ruissellement de surface ;
- **les choix de description du bassin versant**. La non représentation des parcelles privées et l'homogénéisation du type de revêtement des trottoirs permettent de simplifier le travail de modélisation mais induisent un biais entre les résultats du modèle et la réalité du fonctionnement hydrologique du bassin versant ;
- **l'étroite relation entre les bénéfices et le contexte**. En effet, il n'est pas réaliste de donner des résultats quantitatifs absolus qui seraient vrais indépendamment du bassin versant d'application. Les bénéfices des structures perméables sont dépendants du contexte, ainsi tous les enseignements quantitatifs apportés ici ne sont vrais que pour le bassin versant étudié.

Malgré ces limites, l'exploration des différents scénarios et de l'influence des variables de modélisation permet de mettre en évidence quelques ordres de grandeur des bénéfices potentiels des revêtements perméables.

a. Réduction du ruissellement de surface pour un événement centennal

La réduction du ruissellement, donc indirectement de la hauteur d'inondation, est étudiée à partir des différentes simulations d'implantation des revêtements perméables. La Figure 4.57 est tracée en ne gardant, dans les différents scénarios d'implantation, que ceux ayant une surface imperméable drainée moyenne entre 1000 et 2000 m² (soit les scénarios avec une dispersion proche de l'optimum) et ceux d'une surface de zone d'implantation de 50 m² (soit les scénarios présentant la plus grande dispersion).

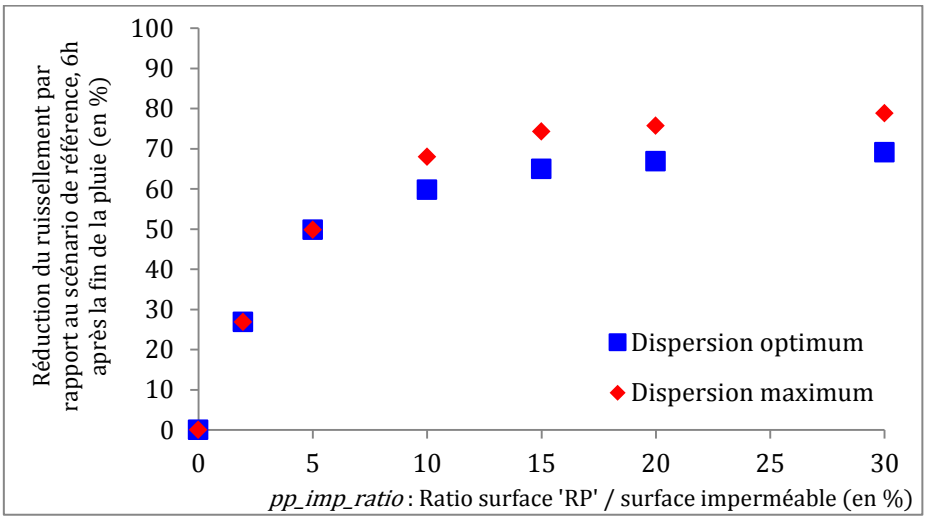


Figure 4.57 – Réduction du ruissellement exprimé en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable.

La Figure 4.57 montre que l'évolution du ruissellement en fonction du ratio de surface de revêtements perméables sur la surface imperméable suit une courbe logarithmique avec un palier atteint autour d'un ratio *pp_imp_ratio* de 10 % à 15 % environ. Une telle évolution met en évidence que les revêtements perméables réduisent le ruissellement dès la première implantation (un ratio de 2 % de surface de revêtements perméables permet déjà de réduire le ruissellement de 27 %).

Ces résultats permettent ainsi de donner un ordre de grandeur de la potentielle réduction du ruissellement en fonction de la proportion et de la taille des structures à revêtements perméables installés, par exemple :

- convertir 5 % de la surface imperméable du bassin versant avec des structures à revêtements perméables de 5 mètres de longueur permettrait de réduire le ruissellement de 50 % ;
- convertir 10 % de la surface imperméable du bassin versant avec des structures à revêtements perméables de 10 mètres de longueur permettrait de réduire le ruissellement de 60 % ;
- convertir 15 % de la surface imperméable du bassin versant avec des structures à revêtements perméables de 15 mètres de longueur permettrait de réduire le ruissellement de 65 %, etc.

Ces résultats ne sont valables que pour le bassin versant étudié et que pour la pluie de référence, à savoir un événement d'occurrence centennale, et ils seront donc différents pour un autre contexte ou pour une autre pluviométrie. Il est cependant probable que l'évolution des bénéfices en fonction du ratio de surface de RP soit similaire d'un bassin à l'autre. Ce qui permet d'avancer qu'un ratio de surface de revêtements perméables de 2 à 10 % semble être le plus adapté pour maximiser l'impact de l'aménagement réalisé. Ratio à adapter en fonction de l'abattement du ruissellement souhaité.

b. Évolution des bénéfices en fonction de la pluviométrie

À partir des résultats des simulations du scénario 'RP puits' il est possible de détailler les résultats précédents en fonction du type d'événement pluvieux. Ainsi, le pourcentage de réduction du volume de ruissellement (Figure 4.58) et le pourcentage de variation de l'infiltration totale (infiltration de surface, par les puits d'infiltration et par les revêtements perméables) (Figure 4.59) sont tracés en fonction du ratio *pp_imp_ratio* et de l'événement pluvieux simulé.

Les résultats de la Figure 4.58 confirment l'évolution logarithmique de la réduction du ruissellement avec l'augmentation du ratio de surface de RP pour tous les types de pluviométrie, à l'exception de l'événement dit « majeur » où l'évolution est moins marquée.

Surtout la Figure 4.58 met en évidence que la réduction du ruissellement apportée par les revêtements perméables est dépendante de l'événement pluvieux considéré, comme cela est souligné dans l'analyse du scénario 'RP puits' (4.3.3). Pour les événements « faibles », « courants » et « occasionnels », la réduction du ruissellement est limitée (entre 2 et 16 %, pour respectivement un ratio *pp_imp_ratio* de 2 et 16 %). L'effet bénéfique des revêtements perméables sur le ruissellement est en revanche plus marqué pour les éléments pluvieux plus importants avec un bénéfice qui croit en fonction de la pluviométrie et de l'intensité.

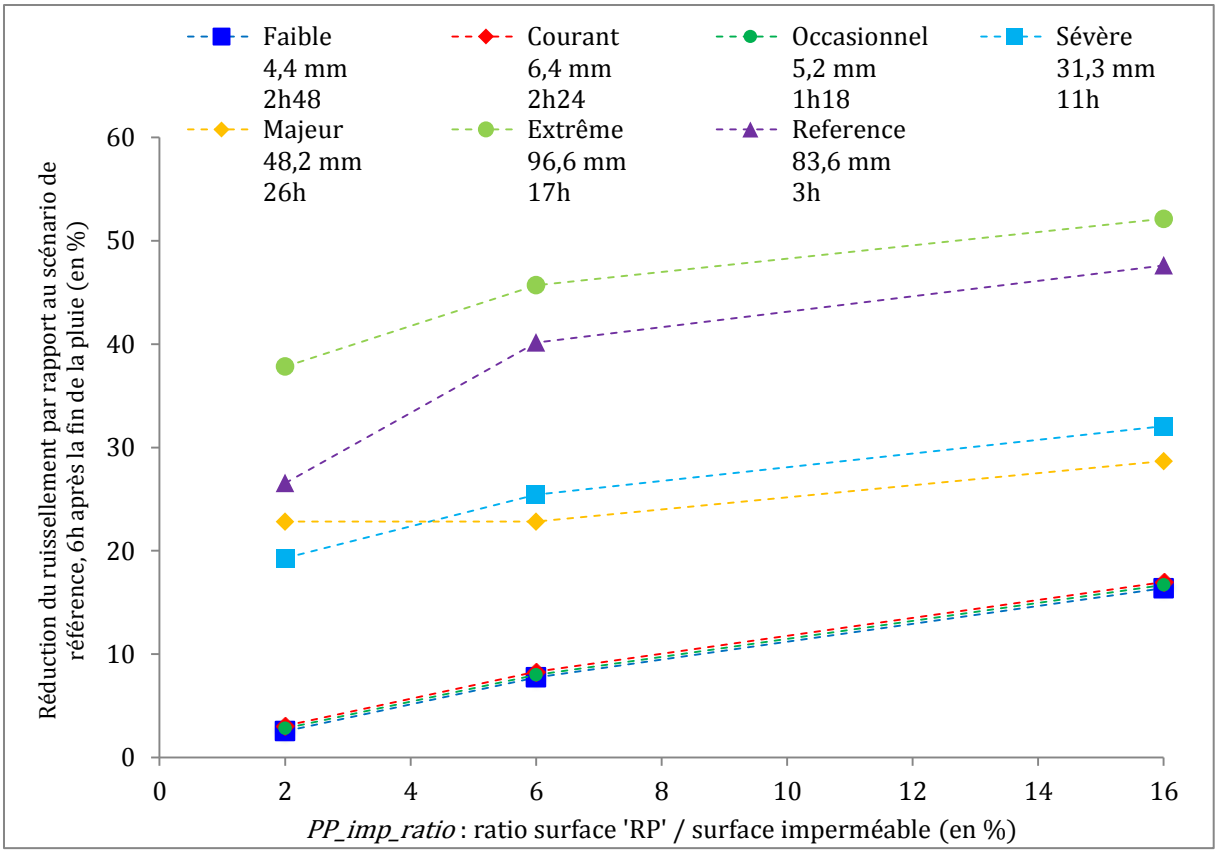


Figure 4.58 - Réduction du ruissellement exprimée en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable pour les différents événements pluvieux simulés (Scénario 'RP puits).

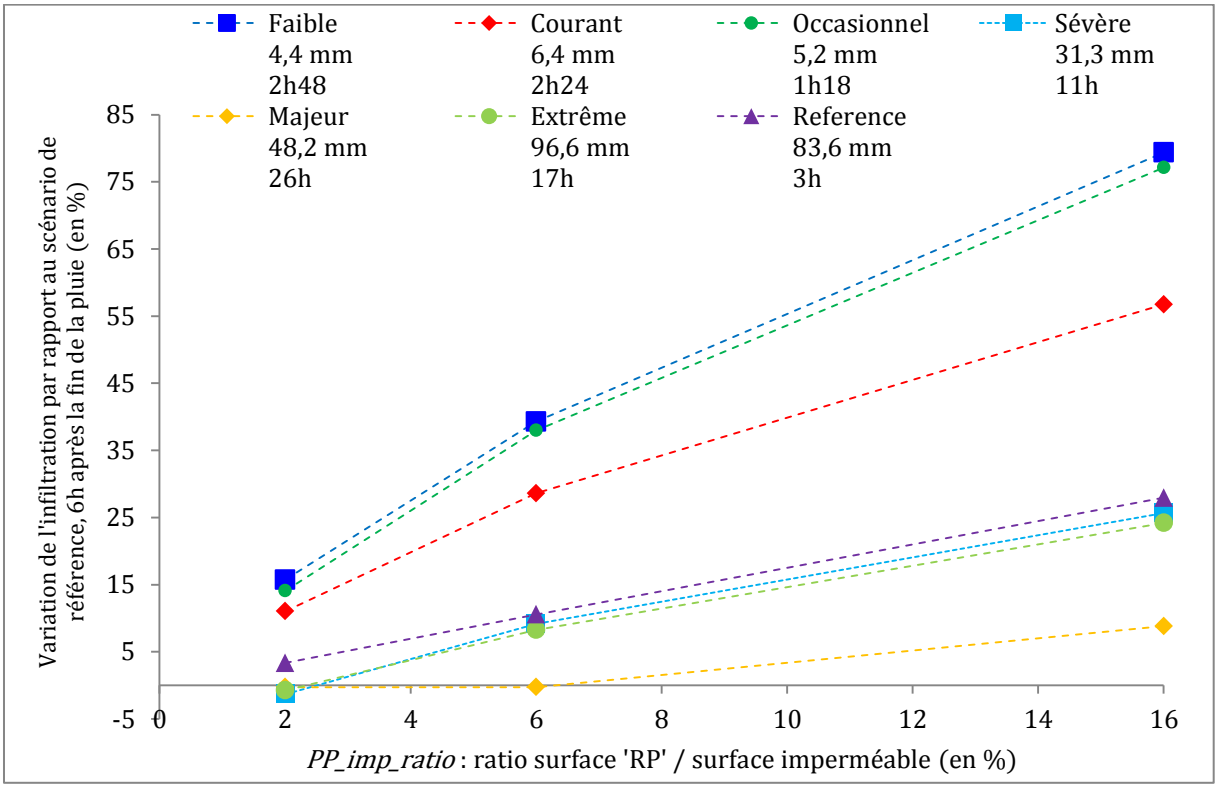


Figure 4.59 – Augmentation de l'infiltration exprimée en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable pour les différents événements pluvieux simulés (Scénario 'RP puits).

Les résultats de la Figure 4.59 montrent que l'augmentation de l'infiltration croit linéairement avec le ratio *pp_imp_ratio*, comme cela a été souligné lors de l'analyse de l'influence du placement des revêtements perméables (4.3.5). Cette croissance linéaire n'est probablement vérifiée que pour les valeurs du ratio *pp_imp_ratio* testées (de 0 à 16 %). Il est probable que l'évolution de l'interception avec ce ratio marque une inflexion (comme cela semble être le cas sur la Figure 4.59) et finisse par atteindre un palier. Surtout, ces résultats mettent en évidence que l'augmentation de l'infiltration est plus marquée pour les événements « faibles », « courants » et « occasionnels » que pour les événements plus importants. Ces résultats s'expliquent en raison du volume d'eau évacué par le drain lors des événements plus importants, ce qui limite le volume de l'infiltration totale.

La Figure 4.59 permet ainsi de mettre en perspective les bénéfices présentés jusqu'ici. En effet, l'objectif des revêtements perméables n'est pas de transformer le ruissellement de surface en un débit évacué vers les réseaux d'eau pluviale. L'intérêt des structures à revêtements perméables est d'absorber le ruissellement de surface et de l'évacuer au maximum par infiltration et évaporation. Aussi, plus que la seule réduction du ruissellement de surface, c'est la réduction du ruissellement de surface et du ruissellement en réseau qu'il conviendrait d'étudier.

c. « Bénéfice net » des revêtements perméables pour un événement centennal

La notion de « bénéfice net » fait écho à l'observation précédente. Elle correspond à la réduction du ruissellement de surface à laquelle est retranchée la variation du ruissellement de réseau. Le bassin versant étudié n'ayant pas de réseau de collecte d'eau pluviale, la quantité d'eau évacuée par les réseaux dans la situation actuelle est nulle. Le volume d'eau évacué par drainage par les structures perméables correspond donc à une augmentation nette du volume de ruissellement de réseau, ou, en l'absence de réseau, à un volume de ruissellement de surface par débordement des structures perméables.

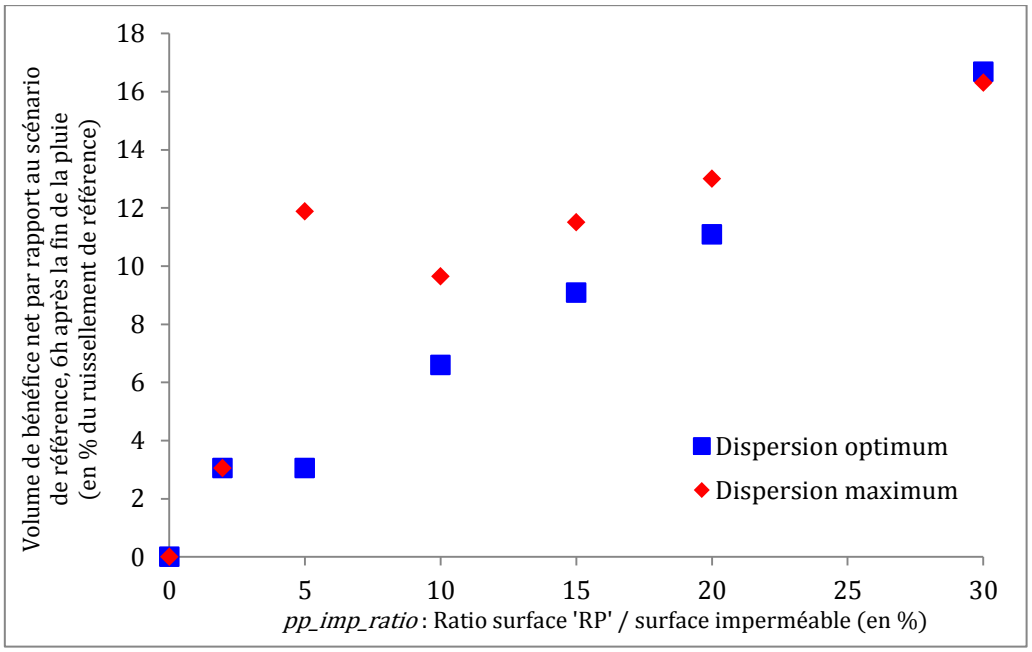


Figure 4.60 – Bénéfice net exprimé en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable.

Les résultats présentés sur la Figure 4.57 sont ainsi revus ici en traçant non plus la réduction du ruissellement mais le bénéfice net (réduction du ruissellement – augmentation du drainage) apporté par la mise en œuvre de revêtements perméables.

La Figure 4.60 montre que l'évolution du bénéfice net croit approximativement linéairement avec l'augmentation du ratio de surface de revêtements perméables et surtout que le bénéfice net de réduction du ruissellement total (de surface et de réseau) est nettement moins important que les valeurs observées sur la Figure 4.57. Cet écart est à relativiser, en effet, car comme cela a été vu (4.2.2), le modèle *PorousCity* surestime le volume de drainage par rapport aux résultats du modèle *PermetAble.*

En comparant la Figure 4.60 avec la Figure 4.59 il apparait que le bénéfice net correspond directement à l'augmentation de l'infiltration. Ce qui est logique au regard de la très faible influence de la mise en œuvre des revêtements perméables sur l'évaporation dans les résultats du modèle.

d. Influence des propriétés des structures perméables

Les différents ordres de grandeur de quantification des bénéfices proposés ci-dessus sont dépendant des propriétés des structures perméables (4.3.6), notamment de leur volume de stockage maximum et de leur perméabilité de surface.

L'exploration du modèle *PorousCity* a confirmé les résultats obtenus au chapitre 3 :

- augmenter le stockage par rétention en surface favorise l'évaporation ;
- augmenter le stockage dans la structure favorise l'infiltration et diminue le drainage ;
- augmenter la vitesse d'écoulement entre la surface et la fondation favorise le drainage et diminue l'infiltration.

L'étude de la variable *PP_flow_in*, représentant la perméabilité de surface des structures perméables, permet également d'explorer les conséquences du colmatage sur les performances des revêtements perméables. Les résultats obtenus montrent une diminution de 4 % de la réduction du ruissellement de surface quand la variable *PP_flow_in* passe de 60 à 6 mm/minute. Ces résultats seraient à approfondir en explorant l'influence d'une diminution plus forte de la perméabilité de surface. Ils soulignent tout de même qu'un colmatage partiel (valeur de perméabilité initiale divisée par dix) ne semble pas entrainer de conséquences majeures sur les bénéfices apportés par ces derniers, ce qui peut s'expliquer par une valeur de perméabilité après colmatage (6 mm/minute) encore relativement élevée.

4.4.2 DISCUSSION SUR LA MODÉLISATION MULTI-AGENTS

Le développement du modèle *PorousCity* et son exploration montre le potentiel offert par les systèmes multi-agents pour la modélisation en hydrologie urbaine. L'idée centrale de cette approche est de décomposer le bassin versant en cellules (ici de 1 m^2) et de décrire les processus hydrologiques à l'échelle de chaque cellule. Cette approche conceptuelle permet d'obtenir rapidement et avec des données initiales limitées des résultats sur le comportement hydrologique d'un bassin versant, et notamment le ruissellement de surface. Différents travaux de recherche, basés sur des automates cellulaires ou des systèmes multi-agents, confirment l'intérêt d'une telle approche pour la modélisation du ruissellement de surface (Rakatoarisoa et al., 2014; Reaney et al., 2006; Webber et al., 2018).

Il convient d'ailleurs de souligner ici que le modèle *PorousCity* relève presque plus d'un automate cellulaire que d'une approche multi-agents. En effet les opérations réalisées interviennent, pour la quasi-totalité, au niveau des cellules. En exploitant plus en avant les possibilités offertes par la modélisation multi-agents il serait certainement possible d'améliorer significativement la modélisation des processus hydrologiques et notamment de pouvoir travailler sur la connectivité du bassin versant et les trajectoires de ruissellement de l'eau en surface comme cela est développé dans les travaux de (Reulier et al., 2017).

Ce modèle pourrait être transposé à d'autres bassins versant en disposant des données d'entrée nécessaires. La modélisation développée nécessite des données de topographie assez fines, ici un MNT avec des mailles de 1 m^2 produit à partir d'un relevé LIDAR, et des données d'occupation du sol, déterminées ici à partir de photographies aériennes et des données hydrogéologiques. De telles données sont généralement disponibles en France, notamment au niveau du littoral qui a été couvert par une campagne de collecte de données topographie par LIDAR. La transposition du modèle à un autre bassin versant peut nécessiter également de représenter des réseaux de collecte des eaux pluviales dans le modèle ce qui demanderait quelques développements complémentaires dont l'ampleur dépendrait du besoin de représenter ou non les écoulements en réseau.

Au regard des résultats obtenus avec le modèle *PorousCity*, ce choix de modélisation peut s'avérer pertinent pour répondre à l'enjeu de la gestion des échelles locales et globales souligné au chapitre 1. Il permet de donner un ordre de grandeur des processus et offre ainsi la possibilité d'explorer différents scénarios d'aménagement. Cependant, cette approche ne semble pas adaptée pour quantifier précisément les processus et elle ne peut donc pas être utilisée pour dimensionner un aménagement. En revanche, la modélisation multi-agents peut être pertinente pour promouvoir la mise en œuvre des techniques alternatives en développant autour du modèle une interface dédiée à un travail de médiation scientifique comme cela a été réalisé dans le cadre du projet LittoSIM (Becu et al., 2017).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les travaux conduits dans le cadre de cette thèse visaient à quantifier par une approche numérique les bénéfices des revêtements perméables en fonction des propriétés de ces structures et de leur environnement. Cette quantification a été déclinée à deux échelles, celle de la structure et celle du bassin versant, avec pour chacune le développement d'un modèle dédié. Cette conclusion générale revient sur le travail de modélisation avant de donner une synthèse des résultats clefs pour chacune des échelles, puis de développer les perspectives de recherche sur les revêtements perméables.

RÉFLEXION ET PERSPECTIVES SUR LA MODÉLISATION EN HYDROLOGIE URBAINE

Les deux modèles développés dans cette thèse ont démontré une certaine pertinence pour l'étude des revêtements perméables tout en présentant des limites.

Le modèle *PermetAble*, basé sur une approche physique, a été calé puis validé avec des données expérimentales issues d'essais en laboratoire. Il représente en 2D, dans un plan vertical, une coupe d'une structure perméable. La relativement bonne corrélation entre les résultats modélisés et mesurés (avec notamment des indices NSE compris entre 0,78 et 0,89 entre les hydrogrammes d'infiltration mesuré et modélisé) démontre la possibilité de construire une modélisation à partir de paramètres obtenus physiquement. Ce « calage physique » permet de limiter la phase de calage numérique du modèle et rend explicite l'influence de chaque paramètre. Une telle modélisation est particulièrement bien adaptée pour explorer les processus qui interviennent à l'intérieur de la structure perméable. En revanche, ce modèle requiert un nombre important de paramètres en entrée et un temps de calcul conséquent. Aussi, même s'il répond à l'objectif initial de quantification des processus, il semble peu adapté si la finalité est « seulement » de connaître le bilan hydrologique en sortie d'une structure perméable dans un contexte donné. Une approche plus conceptuelle ou à l'aide d'un modèle plus éprouvé comme le modèle Hydrus serait probablement plus adaptée.

Le modèle *PorousCity* est basé sur l'utilisation des systèmes multi-agents. Il est construit en important des données de topographie et d'occupation du sol à partir d'un SIG et permet de représenter en 2D, dans un plan horizontal, un bassin versant. Cette approche conceptuelle permet d'étudier des phénomènes globaux, comme le ruissellement de surface sur un bassin versant, à partir de la description des interactions locales, comme l'écoulement de l'eau dans une structure perméable. Cette interaction entre les échelles locales et globales est particulièrement intéressante en hydrologie urbaine. La vérification des résultats du modèle montre sa pertinence pour donner un ordre de grandeur du bilan hydrologique global, ce qui permet d'explorer l'influence des paramètres du bassin versant ou des ouvrages hydrologiques. En revanche, cette modélisation ne permet pas de quantifier précisément les processus hydrologiques et n'est pas adaptée pour un travail de dimensionnement d'ouvrages ou de prédiction des phénomènes hydrologiques (inondations, saturation des réseaux, etc.). Enfin, une telle modélisation peut être un outil adapté pour donner une première estimation du bilan hydrologique d'une structure perméable puisque les résultats du modèle *PorousCity* ont démontré une assez bonne corrélation avec les résultats du modèle *PermetAble.*

Le travail de modélisation à deux échelles et dans deux plans différents (vertical et horizontal) permet de souligner l'importance des choix de modélisation et des approximations faites sur les possibilités d'exploitation du modèle. Ainsi, le modèle *PermetAble* permet d'étudier le stockage dans la structure puisque ce dernier est spatialisé et détaillé, en revanche l'estimation du ruissellement entrant dans la structure nécessite des approximations et ne peut pas représenter fidèlement la dynamique de ce flux puisque la génération du ruissellement n'est pas représentée dans le modèle. La situation est inversée avec le modèle *PorousCity* qui permet d'étudier la génération et l'écoulement du ruissellement de surface de façon spatialisée mais réduit le stockage dans la structure à une variable numérique.

PERFORMANCES ET OPTIMISATION DES STRUCTURES PERMÉABLES

L'exploration du modèle *PermetAble* a permis de proposer une représentation simplifiée des structures à revêtements perméables sous la forme de la combinaison de deux réservoirs : un réservoir dit de rétention correspondant aux couches de surface de la structure, et un réservoir dit de saturation correspondant à la partie basse de la couche de fondation.

Cette représentation met en évidence le rôle particulier de la couche drainante en surface et du lit de pose. Ces deux couches permettent de ralentir l'écoulement de l'eau vers la fondation et d'en stocker une partie qui est alors disponible pour l'évaporation. Les simulations réalisées ont souligné l'influence de la perméabilité et des paramètres décrivant la courbe de rétention d'eau sur la rétention dans ces deux matériaux. Les résultats obtenus montrent également l'importance des propriétés de la couche de fondation. La partie haute (au-dessus du drain) assure un rôle de transfert entre les deux réservoirs. En diminuant la perméabilité de cette couche, l'écoulement de l'eau est ralenti ce qui retarde l'arrivée de l'eau au fond de la structure et favorise l'infiltration au détriment du drainage. Le réservoir de stockage dit de saturation dépend quant à lui principalement de la position du drain. Les différentes simulations ont souligné l'importance de placer le drain le plus haut possible mais également le plus éloigné possible du flux entrant principal pour maximiser le stockage et l'infiltration.

L'exploration du modèle *PermetAble* a également permis de comparer les performances des structures perméables pour différents événements pluviométriques. Les résultats obtenus montrent que l'infiltration constitue le processus largement majoritaire (98 % du volume d'eau entrant) pour tous les évènements de 'faible' à 'majeur'. L'évacuation de l'eau par un drain situé à 25 cm du fond de la structure n'intervient que lors des évènements dits 'extrêmes', soit des évènements avec un cumul de précipitation de plus de 80 mm et une période de retour de plus de 25 ans.

La comparaison des différents scénarios portant sur les propriétés du site ou de la structure permet de moduler ces performances en fonction du contexte d'utilisation ou des choix de conception. La perméabilité du sol ressort comme la propriété influençant le plus l'infiltration en sortie de la structure avec un volume infiltré qui passe de 99 % du volume total entrant pour un sol sableux ($K_s = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s), à 57 % pour un sol limoneux ($K_s = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s) et à seulement 1 % pour un sol argileux ($K_s = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s), lors de la simulation de l'événement de référence (orageux d'occurrence centennale). En considérant le bilan hydrologique annuel, près de 70% du volume total de précipitations pourraient être infiltrés par une structure perméable située sur un sol avec une perméabilité $K_s = 5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Ce résultat reflète la part importante du cumul de précipitations annuelles qui intervient lors de faibles, voire très faibles précipitations en

Normandie. Ces résultats confirment l'importance des propriétés hydrogéologiques pour la mise en œuvre de structures à revêtements perméables mais surtout mettent en évidence l'importance de la connaissance du climat local et des régimes de précipitations.

BÉNÉFICES ET IMPLANTATION DES STRUCTURES PERMÉABLES

Le modèle *PorousCity* permet de mettre en évidence l'impact de la mise en œuvre de revêtements perméables sur le ruissellement de surface en fonction du ratio de surface de revêtements perméables sur la surface imperméable. Les résultats obtenus montrent une réduction du ruissellement de surface de : 27 % pour un ratio de 2 %, 50 % pour un ratio de 5 %, 60 % pour un ratio de 10 %, 65 % pour un ratio de 15 %, et 70 % pour un ratio de 30 % (pour la pluie de référence).

Ces résultats sont à relativiser en prenant en compte le volume évacué par le drain. En effet, la réduction du volume de ruissellement total (de surface et par le réseau), appelée bénéfice net dans le manuscrit, est comprise entre 3 et 17 % du volume de ruissellement.

Ces résultats ne sont pas une quantification exacte mais donne un ordre de grandeur du bénéfice potentiel des revêtements perméables pour le bassin versant étudié et pour la pluie de référence. L'étude des différentes typologies de pluie montre que la réduction du ruissellement varie fortement en fonction de la pluviométrie. Elle est plus faible pour les événements courants et plus marquée pour les événements importants. Cette tendance est inversée en ce qui concerne l'augmentation de l'infiltration. En effet, lors des événements courants la quasi-majorité de l'eau entrant dans les revêtements perméables est infiltrée alors que lors des événements importants une partie non négligeable de l'eau est drainée.

Les simulations conduites avec le modèle *PorousCity* confirment les observations établies avec le modèle *PermetAble* concernant l'influence de la capacité de rétention et de stockage dans la structure. Augmenter ces deux propriétés permet de favoriser l'évaporation et/ou l'infiltration et donc de réduire le volume évacué par le drain. L'étude de la valeur de perméabilité de surface montre quant-à-elle que le passage d'une perméabilité de surface de 60 à 6 mm/minute n'entraîne pas de variation forte des performances des structures perméables (diminution de 4 % de la réduction du ruissellement).

Enfin, et surtout, le modèle *PorousCity* avait pour but d'explorer l'influence de la localisation des revêtements perméables sur leurs bénéfices. L'analyse de l'influence du placement des revêtements perméables a montré l'importance de la dispersion des zones de revêtements perméables sur leurs différents bénéfices : réduire le ruissellement de surface, favoriser l'évaporation et l'infiltration, et limiter le volume évacué par drainage. Cette observation peut se traduire en recommandations pratiques : ne pas trop concentrer les surfaces perméables, au risque de diminuer leur influence sur le ruissellement, et ne pas prévoir l'implantation de zones trop petites, au risque de saturer trop vite leur réservoir de stockage. De plus, les résultats obtenus soulignent l'existence d'un ratio optimal entre la surface imperméable drainée par une structure perméable et la taille de cette structure. Des améliorations du modèle *PorousCity* seraient nécessaires pour pouvoir estimer cette valeur. En l'état actuel du modèle, les simulations réalisées montrent que, pour le bassin versant étudié, une surface drainée par zone perméable entre 1000 et 2000 m^2 serait la plus optimale pour minimiser le ruissellement et le drainage et maximiser l'infiltration et le stockage.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE SUR LES REVÊTEMENTS PERMÉABLES

Le développement et l'exploration des deux modèles a soulevé des questions qui n'ont pas pu être traitées dans le cadre de ce travail. La liste ci-dessous met en avant plusieurs perspectives concernant l'étude des revêtements perméables qui pourraient orienter de futures recherches.

- **Mesurer et modéliser l'évaporation *via* les structures perméables**. Les deux modèles représentent de façon imparfaite l'évaporation, en partie en raison des choix pris dans leur développement, mais également en raison du manque de données expérimentales sur la capacité d'évaporation des revêtements perméables. Un travail expérimental voire de terrain serait nécessaire ici pour quantifier ce phénomène et par la suite permettre de caler un modèle qui représente fidèlement l'évaporation. Un tel modèle gagnerait à modéliser l'écoulement de l'eau et les échanges de température dans une approche physique, qui résout de façon couplée les équations thermo-hydrogéologiques.
- **Optimiser l'évaporation *via* les structures perméables.** En complément du point précédent et en s'appuyant sur de futurs travaux de mesure et de modélisation de l'évaporation, il serait intéressant d'étudier les propriétés des structures qui permettent d'optimiser l'évaporation en surface des revêtements perméables. Cette question est d'autant plus importante dans un contexte d'augmentation des enjeux et de l'intérêt autour de la question de la lutte contre les îlots de chaleur.
- **Optimiser les propriétés des matériaux de la structure pour favoriser l'évaporation et l'infiltration**. En lien avec la perspective précédente, les résultats obtenus dans ce travail ont souligné l'influence des propriétés des matériaux de la structure sur la rétention en surface d'une part et le stockage dans la fondation d'autre part.
    - En surface il serait intéressant de travailler sur une formulation de matériaux (porosité, tortuosité, etc.) pour augmenter leur capacité de rétention. Dans cet objectif, l'étude plus approfondie des interfaces entre matériaux et de l'influence du géotextile situé sous le lit de pose semble être des pistes intéressantes.
    - Pour la fondation, au regard des résultats obtenus sur l'influence de la perméabilité, il serait pertinent d'étudier les règles de détermination de la courbe granulométrique de la couche de fondation pour chercher à augmenter le volume de stockage tout en limitant la valeur de perméabilité. De telles recherches pourraient même aller jusqu'à la proposition de matériaux spécifiques, qui, de par leur géométrie et leurs propriétés hydrologiques, présenteraient une porosité élevée tout en ayant une tortuosité et une capacité de rétention importantes.
- **Tester l'influence des pertes de charges dues aux forces d'inertie sur la modélisation des écoulements dans les structures à revêtements perméables**. Comme cela a été souligné, les hypothèses d'utilisation de l'équation de RICHARDS ne sont probablement pas vérifiées compte tenu des vitesses élevées de l'écoulement de l'eau atteintes dans la structure. Cette équation est pourtant largement utilisée dans la littérature pour la représentation des écoulements dans les structures perméables. L'utilisation d'une autre loi d'écoulement, comme celle de FORCHHEIMER, pourrait permettre de quantifier l'erreur éventuellement commise.

- **Approfondir l'utilisation des systèmes multi-agents pour la modélisation en hydrologie urbaine.** Le modèle *PorousCity* et les modèles qui l'ont inspiré montrent le potentiel des systèmes multi-agents pour l'étude de l'hydrologie urbaine. Cette approche semble particulièrement adaptée pour l'étude du ruissellement de surface. Le suivi individualisé des trajectoires de chaque « goutte », possible grâce à l'utilisation d'agents dédiés, pourrait notamment permettre d'approfondir la compréhension des phénomènes d'accumulation de l'eau et améliorer la détermination des emplacements stratégiques pour la mise en œuvre d'ouvrages.
- **Définir et tester un indicateur de dispersion des zones de revêtements perméables robuste et simple d'utilisation.** La notion de dispersion des zones d'implantation des revêtements perméables mériterait d'être approfondie et confirmée pour différents bassins versants. Surtout, il serait intéressant de développer un indicateur de dispersion basé sur la surface drainée par chaque zone.
- **Prendre en compte de longues chroniques de pluie.** Seuls des événements ponctuels ou de « courtes » séries d'événements ont été utilisés comme données pluviométriques en entrée des deux modèles. Pour approfondir l'étude du bilan hydrologique annuel et étudier le comportement des revêtements perméables hors des seules périodes de pluie, il serait nécessaire de modéliser de longues chroniques de pluie. Une telle démarche serait notamment utile pour étudier le potentiel d'évaporation des revêtements perméables.

RÉFÉRENCES

Abdo, J. (2007). *Voiries et aménagements urbains en béton - Revêtements et structures réservoirs*. p. 171. CIMBéton, Collection Technique, Rapport T57. La Défense, France

Abdo, J. et L. Monfront. (2011). *Aménagement urbains et produits de voirie en béton*. p. 110. CIMBéton, Collection Technique, Rapport T54. La Défense, France

ACI. (2010). *Report on Pervious Conrete*, p. 40. Farmington Hills, Etat-Unis: American Concrete Institute.

AFNOR. (2006). *NF P98-170. Chaussées en béton de ciment - Exécution et contrôle.*, p. 26. Paris, France: AFNOR.

Agouridis, C. T., J. A. Villines, et J. D. Luck. (2011). *Permeable Pavement for Stormwater Management* (No. AEN-108), p. 7. Lexington: University of Kentucky college of agriculture.

Amouroux, E., T.-Q. Chu, A. Boucher, et A. Drogoul. (2007). GAMA: An Environment for Implementing and Running Spatially Explicit Multi-agent Simulations. In *Agent Computing and Multi-Agent Systems*, p. 359‑371. Springer, Berlin, Heidelberg.

Andrieu, H., S. Barraud, et B. Tassin. (2008). Perspectives dans le domaine de l'hydrologie urbaine.

Argue, J. R. et M. D. Allen.(2005). *Water Sensitive Urban Design: Basic Procedures for « Source Control » of Stormwater : A Handbook for Australian Practice*. University of South Australia.

Arya, L. M., F. J. Leij, M. T. Van Genuchten, et P. J. Shouse. (1999). Scaling parameter to preditc the soil-water characteristic from particule-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal 63*, 510‑519.

Arya, L. M. et J. F. Paris. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particule-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal 45*, 1023‑1030.

Astaraie-Imani, M., Z. Kapelan, G. Fu, et D. Butler. (2012). Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK. *Journal of Environmental Management 112*, 1‑9.

Aubertin, M., O. Fala, J. Molson, A. Gamache-Rochette, B. Lahmira, V. Martin, et al. (2005). *Evaluation du comportement hydrogeologique et géochimique des haldes a stériles*, p. 40. Montreal: Les presses Internationales de Polytechnique.

Aubertin, M., M. Mbonimpa, B. Bussière, et R. P. Chapuis. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal 40*, 1104‑1122.

Barraud, S. (2009). *L'infiltration en questions. Recommandations pour la faisabilité la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain*, p. 63. Lyon, France: INSA LGCIE-DEEP.

Barraud, S., J.-L. Bertrand-Krajewski, et B. Chocat. (2010). Hydrologie Urbaine. Cours de 4ème année du département GCU. INSA Lyon.

Barraud, S. et S. Le Coustumier. (2008). *Calage de modèles optimisés de fonctionnement hydrologique diachronique des bassins d'infiltration et analyse de l'évolution du colmatage* (No. Délivrables D-A2 & D-A3), p. 44. Lyon, France: INSA LGCIE-DEEP.

Barroca, B., C. Piel, D. Serre, Y. Diab, et C. Porteneuve. (2010). Comment la forme urbaine peut-elle compléter le réseau d'assainissement pluvial ? De la maîtrise des écoulements lors des événements exceptionnels à la gestion des pollutions, p. 10. Présenté à Novatech 2010.

Barron, O. V., A. D. Barr, et M. J. Donn. (2013). Effect of urbanisation on the water balance of a catchment with shallow groundwater. *Journal of Hydrology 485*, 162‑176.

Baud, J. (2008). *Modélisation de la gestion des eaux de pluie en milieu urbanisé : Méthodologie de construction d'un modèle en vue d'une application avec le logiciel PCSWMM.net*, p. 31. Rapport de master. Lausanne, Suisse: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Bean, E. Z. et D. A. Bidelspach. (2004). Study on the infiltration rate of permeable pavements. p. 10. Présenté à 1st Water and environment specialty conference of canadian sociatity for civil engineering.

Bean, E. Z. et W. F. Hunt. (2007). Field survey of permeable pavement surface infiltration rates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133,-Asce*.

Beauchamp, L. (2014). *Les inondations pluviales du 22 juillet 2013. Etude d'un évènement climatique extrême* (Mémoire de Master 1), p. 119. Caen, France: UFR de Géographie.

Becu, N., M. Amalric, B. Anselme, E. Beck, X. Bertin, E. Delay, et al. (2017). Participatory simulation to foster social learning on coastal flooding prevention. *Environmental Modelling & Software 98*, 1‑11.

Beeldens, A., F. Gendera, T. Van den Berghe, G. Van den Heyning, et L. Vijverman. (2008). *Revêtements drainants en pavés de béton* (Annexe au bulletin CRR n°77), p. 20. Bruxelles: CRR.

Berthier, E. (1999). *Contribution à une modelisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modele et premiere évaluation*. (Thèse pour Doctorat). INPG Grenoble, Grenoble.

Berthier, E., S. Dupont, P. G. Mestayer, et H. Andrieu. (2006). Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *Journal of Hydrology 328*, 635‑646.

Bertrand-Krajewski, J.-L. (2006). Cours - Hydrologie Urbaine. INSA Lyon.

Biarez, J., J.-M. Fleureau, M.-I. Zerhouni, et B. S. Soepandji. (s. d.). Variation de volume des sols argileux lors de cycles de drainage. *Revue française de géotechnique* 63‑71.

Bigand, E., D. Collet, R. Lacaisse, et C. Laval. (2012). *Vivre avec les inondations de la résistance à la résilience*, p. 1‑193. Paris, France: Science Po.

Bittelli, M., R. Valentino, F. Salvatorelli, et P. Rossi Pisa. (2012). Monitoring soil-water and displacement conditions leading to landslide occurrence in partially saturated clays. *Geomorphology 173‑174*, 161‑173.

Boogaard, F. C., T. Lucke, H. Sommer, J. De Beer, V. D. Giesen, N. C, et al. (2014). Lessons learned from over two decades of global swale use. In *13th International Conference on Urban Drainage Book of Abstracts*, p. 9. Malaysia.

Bouget, E., N. Chavane, M. Dubois, et C. Ntsame Ndo. (2018). *Etude comparative du comportement des pavés drainants en fonction de la perméabilité du terrain naturel. Modélisation d'une structure perméable avec pavés drainants à base de coquillages.* (Master 2), p. 10. Caen, France: ESITC Caen.

Boutelet-Blocaille, M., A. Larceneux, et A. Barczak. (2010). *Gouvernance de l'eau*. Dijon: Éd. universitaires de Dijon.

Boutouil, M. et D. H. Nguyen. (2014). *Rapport technique final du rapport VECOP - Valorisation dE COProduits coquilliers marins en ECO-Pavé drainant*, p. 30. Caen: ESITC Caen.

Brattebo, B. O. et D. B. Booth. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research 37*, 4369‑4376.

Braud, I., P. Breil, F. Thollet, M. Lagouy, F. Branger, C. Jacqueminet, et al. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of Hydrology 485*, 5‑23.

Breton, N., Z. Todorovic, et D. Crayston. (2013). Screening tool for water improvements, flood risk management and urban regeneration trough surface water flood reduction at regional scale. Présenté à Novatech 2013. In *C3 - T.A. / Efficacité globale*, p. 1‑8. Lyon, France.

Brooks, R. H. et A. T. Corey. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers* 37.

Brown, R. A. et M. Borst. (2015). Quantifying evaporation in a permeable pavement system. *Hydrological Processes 29*, 2100‑2111.

Brunetti, G., J. Šimůnek, et P. Piro. (2016). A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology 540*, 1146‑1161.

Brunetti, G., J. Šimůnek, M. Turco, et P. Piro. (2017). On the use of surrogate-based modeling for the numerical analysis of Low Impact Development techniques. *Journal of Hydrology 548*, 263‑277.

Bussière, B. (1999). *Etude du comportement hydrique de couverture avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques.* Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal.

Camporese, M., J. F. Dean, P. E. Dresel, J. Webb, et E. Daly. (2013). Hydrological modelling of paired catchments with competing land uses, p. 1819‑1825. Présenté à 20th International congress on modelling, Adelaide, Autralia.

Cantat, O. (2004a). Analyse critique sur les tendances pluviométriques au 20ème siècle en Basse-Normandie : réflexions sur la fiabilité des données et le changement climatique. *Climatologie* 11‑32.

Cantat, O. (2004b). Les inondations d'origine climatique et hydrogéologique. Approche systémique et quadridimensionnelle. *L'Information Géographique 68*, 63‑70.

Cantat, O. et L. Brunet. (2001). Discontinuité géographique et particularités climatiques en Basse-Normandie. *Annales de géographie 110*, 579‑596.

Cantat, O., J.-M. Cador, et E. Agasse. (2002). L'originalité des inondations de 2000-2001 dans la Plaine de Caen (Normandie, France). Quand la montée des nappes souterraines prolonge le débordement des rivières. *Annales de géographie 111*, 246‑264.

Cantat, O., S. Héricher, M.-A. Bühler, E. Caillebotte, E. Jambu, J.-F. Barbot, et al. (2015). *Profil environnemental de Basse-Normandie. Le Climat*, p. 80. Caen, France: Région Basse-Normandie.

Cantat, O., S. Héricher, M.-A. Bühler, E. Caillebotte, E. Jambu, J.-F. Barbot, et al. (2018). *Profil environnemental de Normandie. Le Climat*. Caen, France: Région Normandie.

Carbone, M., M. Turco, G. Brunetti, et P. Piro. (2015). A Cumulative Rainfall Function for Subhourly Design Storm in Mediterranean Urban Areas. *Advances in Meteorology*.

Cardinal, T., A. Le Dain, et A. Sallent. (2017). *Collecte et exploitation de données de terrain pour la construction d'une cartographie SIG de la ville de Ouistreham dans le but de modéliser l'impact de la mise en place de revêtements perméables* (Rapport de Master 2), p. 185. Caen, France: Université de caen.

Carsel, R. F. et R. S. Parrish. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research 24*, 755‑769.

CERIB. (2009). *Voirie et aménagements publics - Guide de conception des ouvrages réalisés à partir de pavés, dalles, bordures et caniveaux préfabriqués en béton*. Epernon, France: CERIB.

CERTU. (1999). *Chaussées poreuses urbaines*. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, France.

CERTU. (2001). *Mémento pour la gestion des projets d'assainissement - Fascicule n°3 : les eaux pluviales*, p. 42. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, France.

CERTU. (2003). *La ville et son assainissement principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau*. p. 503. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, France.

CERTU. (2006). *Les collectivités locales et le ruissellement pluvial*. p. 82. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, France.

Chen, J., A. A. Hill, et L. D. Urbano. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology 373*, 184‑192.

Chocat, B. (1978). *Un modèle de simulation des écoulements dans les réseaux d'assainissement pluvial*. (Thèse pour Doctorat). INSA de Lyon, Lyon, France.

Chocat, B. (2002). Sustainable management of water in cities, p. 1‑21. Présenté à Challenges of the new water policiesfor the XXIcentury, Universidad Internacional Menendez Pelayo – Valence (Espagne).

Chocat, B. (2009). La gestion durable des eaux pluviales urbaines : évolution des stratégies et techniques disponibles. In *Weka « ville durable »*.

Chocat, B. (2014). Méli Mélo - Les eaux pluviales en ville. Consulté 6 octobre 2015, à l'adresse http://www.graie.org/eaumelimelo/Meli-Melo/Questions/Les-eaux-pluviales-en-ville/?parent=4

Chocat, B. (2015). *Faut-il infiltrer les eaux pluviales en ville*, p. 17. Graie.

Chocat, B., J.-L. Bertrand-Krajewski, et S. Barraud. (2012). Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie. p. 19. Cours INSA de Lyon, Lyon, France.

Chossat, J.-C. (2005). *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols*. Paris: Lavoisier.

Coleri, E., M. Kayhanian, J. T. Harvey, K. Yang, et J. M. Boone. (2013). Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators. *Journal of Environmental Management 129*, 164‑172.

Cosandey, C. et M. Robinson. (2000). *Hydrologie continentale*. Paris: A. Colin.

Cosandey, C. et M. Robinson. (2012). *Hydrologie continentale (2e Edition)*. Paris: A. Colin.

Coutard, O. (2008). The urban impacts of reforms in the networks sector. In *Yearbook 2007 of the Institute for Advanced Studies on Science, Technology and Society*, p. 135‑150. Profil.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M., Bingner, W.R. L., Harmel, R. D. et Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE 50*, 885‑900.

Dakhlaoui, M. (1996). *Fonctionnement hydraulique des structures réservoirs pour l'assainissement pluvial : étude des dispositifs de diffusion d'eau et modélisation du couple drain-milieu poreux*. (Thèse pour Doctorat). Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Dawson, A. (Ed.). (2009). *Water in Road Structures*, Vol. 5. Dordrecht: Springer Netherlands.

Direction des routes et des transports. (2010). *Catalogue des revêtements adaptés aux véloroutes, voies vertes, pistes cyclables et bandes cyclables*, p. 36. Yvelines: Conseil Général des Yvelines.

DREAL Normandie. (2014). *Notice technique. Cartographie de la directive inondation. TRI de Caen et de Dives-Ouistreham.* Caen, France.

Elliott, A. H. et S. A. Trowsdale. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software 22*, 394‑405.

EPA. (1999). *Storm Water Technology Fact Sheet - Porous Pavement* (No. 832- F-99-023), p. 7. Washington, Etats-Unis: United Stats Environmental Protection Agency.

Faleyeux, J. (2015). *Elements modulaires en beton pour revetement des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales : référentiel technique*. Epernon, France: CERIB.

Fletcher, T. D., H. Andrieu, et P. Hamel. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources 51*, 261‑279.

Fredlund, D. G. et A. Xing. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal 31*, 521‑532.

Fressard, M. (2006, août 7). *Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France)*. (Thèse pour Doctorat). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science Volume 85*, 228‑232.

Garrigues, A. (2013). L'infiltration par revêtements poreux - Règles techniques. *Le Moniteur*.

Ghanbarian-Alavijeh, B., A. Liaghat, G.-H. Huang, et T. Van Genuchten. (2010). Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. *Pedosphere* 456‑465.

GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]*, p. 161. Genève, Suisse: GIEC.

Gires, A. (2012, octobre 5). *Analyses et simulations multifractales pour une meilleure gestion des eaux pluviales en milieu urbain et péri-urbain* (Thèse pour Doctorat). Université Paris-Est, Paris, France.

Göbel, P., P. Strake, J. Meber, et W. G. Coldewey. (2013). Urban water budget of evaporation-optimized concrete pervious pavements. Présenté à Novatech 2013. In *B1 - Revêtements poreux*, p. 1‑8. Lyon, France.

Göbel, P., P. Strake, A. Voss, et W. G. Coldewey. (2013). Field measurements of evapotranspiration rates on seven pervious concrete pavement systems. Présenté à Novatech 2013. In *B1 - Revêtements poreux*, p. 1‑10. Lyon, France.

Godbout, J., B. Bussière, M. Aubertin, T. Belem, et M. Benzaazoua. (2004). Evolution des propriétés de rétention d'eau des remblais miniers cimentés en pâte durant le curage. In *57ème Congrès Canadien de géotechnique*, Vol. Session 4G, p. 15‑22. Québec.

Goutaland, D., T. Winiarski, R. Angulo-Jaramillo, L. Lassabatère, G. Bièvre, J.-F. Buoncristiani, et al. (2007). Etude hydrogéophysique de la zone non saturée hétérogène d'un bassin d'infiltration d'eaux pluviales. *BLPC* 173‑192.

Gralepois, M. et S. Guevara. (2015). L'adaptation aux risques d'inondation façonnée par les métiers de la ville. Tensions à l'échelle du projet d'aménagement. *Développement durable et territoires Vol.6*, 1‑17.

Grand Lyon. (2008a). *Aménagement et eaux pluviales : Guide à l'usage des professionnels*, p. 51. Lyon, France.

Grand Lyon. (2008b). *Aménagement et eaux pluviales : Guide pratique*, p. 58. Lyon, France.

Grimm, V., U. Berger, F. Bastiansen, S. Eliassen, V. Ginot, J. Giske, et al. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling 198*, 115‑126.

Grimm, V., U. Berger, D. L. DeAngelis, J. G. Polhill, J. Giske, et S. F. Railsback. (2010). The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling 221*, 2760‑2768.

Grommaire, M.-C., L. Veiga, M. Grimaldi, et N. Aires. (2013). *Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines*, p. 64. LEESU ; Agence de l'eau Seine Normandie ; Composante Urbaine.

Guiraud, P. (2013). L'espace souterrain, une ressource au service de la ville durable, p. 1‑8.

Haase, D. (2009). Effects of urbanisation on the water balance – A long-term trajectory. *Environmental Impact Assessment Review 29*, 211‑219.

Halleux, J.-M. et J.-M. Lambotte. (2005). Morphologie urbaine et économie des services collectifs. In *Qualité environnementale des bâtiments : quels bénéfices ?*, p. 150‑162. Bruxelles: La lettre volée.

Haverkamp, R. et J. Parlange. (1986). Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science 142*, 325‑339.

Hingray, B., C. Picouet, et A. Musy. (2009). *Hydrologie 2 une science pour l'ingénieur*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Hollenbeck, I. et P. Göbel. (2013). Water-permeable pavements as the sole storm water management strategy - problems and possibilities. Présenté à Novatech 2013. In *B1 - Revêtements poreux*, p. 1‑7. Lyon, France.

Huang, J., J. He, C. Valeo, et A. Chu. (2016). Temporal evolution modeling of hydraulic and water quality performance of permeable pavements. *Journal of Hydrology 533*, 15‑27.

Hunt, W. F. (2011). *Maintaining Permeable Pavements*, p. 8. Raleigh, NC 27695, États-Unis: North Carolina State Universit.

Hunt, W. F. et K. A. Collins. (2008). *Permeable Pavement: Research Update and Design Implications*, p. 12. Raleigh, NC 27695, États-Unis: North Carolina State University.

IGN. (2015). *Litto3D. Descriptif de contenu*, p. 33. Paris, France.

Illgen, M., K. Harting, T. G. Schmitt, et A. Welker. (2007). Runoff and Infiltration characteristics of permeable pavements – Review of an intensive monitoring program, p. 8. Présenté à Novatech 2007.

Jacobson, C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management 92*, 1438‑1448.

Janvier, F., F. Nirascou, et P. Sillard. (2015). *L'occupation des sols en France : progression plus modérée de l'artificialisation entre 2006 et 2012* (Statistiques No. 219), p. 4. La Défence, France: Commissariat général au développement durable.

Jayasuriya, N. et N. Kadurupokune. (2008). Impact of pervious pavements on drainage infrastructure, p. 10. Présenté à 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

Jha, A. K., R. Bloch, et J. Lamond. (2012). *Villes et inondations - Guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour le XXIe siècle - Résumé à l'intention des décideurs*. Washington, Etats-Unis: Banque internationale pour la reconstruction et le développement/ Association internationale de développement de la Banque mondiale.

Kamali, M., M. Delkash, et M. Tajrishy. (2017). Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *Journal of Environmental Management 187*, 43‑53.

Kevern, J. T., V. R. Schaefer, et K. Wang. (2009). Evaluation of Pervious Concrete Workability Using Gyratory Compaction. *Journal of Materials in Civil Engineering 21*, 764‑770.

Kovacs, G. (1981). *Seepage Hydraulics*, 1re éd., Vol. 10. Elsevier Science.

Krebs, G., T. Kokkonen, M. Valtanen, H. Setälä, et H. Koivusalo. (2014). Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology 512*, 482‑497.

La Jeunesse, I. et P. Quevauviller. (2016). *Changement climatique et cycle de l'eau. Impacts, adaptation, législation et avancées scientifiques*. Paris, France: Lavoisier.

Lambert, R. (1995). *Géographie du cycle de l'eau*. Toulouse: Presses universitaires du Mirail.

Legret, M. et V. Colandini. (1999). Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: Water quality and fate of heavy metals. *Water Science and Technology 39*, 111‑117.

Leong, E. C. et H. Rahardjo. (1997). Permeability Functions for Unsaturated Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123*, 1118‑1126.

Li, H., J. Harvey, et Z. Ge. (2014). Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials. *Construction and Building Materials 65*, 367‑375.

Li, Y. et R. W. Babcock. (2015). Modeling Hydrologic Performance of a Green Roof System with HYDRUS-2D. *Journal of Environmental Engineering 141*, 04015036.

Lin, W., D.-G. Park, S. W. Ryu, B.-T. Lee, et Y.-H. Cho. (2016). Development of permeability test method for porous concrete block pavement materials considering clogging. *Construction and Building Materials 118*, 20‑26.

Liu, Y. (2005). *Three Dimensional Finite Element Modeling of Pavement Subsurface Drainage Systems.* (Thèse pour Doctorat). University of Kentucky.

Londra, P. et G. Kargas. (2018). Evaluation of hydrodynamic characteristics of porous media from one-step outflow experiments using RETC code. *Journal of Hydroinformatics* jh2018148.

Malet, J.-P. (2003). *Les « glissements de type écoulement » dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique*. (Thèse pour Doctorat). Université Louis Pasteur Strasbourg, Strasbourg.

Magnan, J.-P. et Delage, P. (2015). *Géotechnique*, Vol. base documentaire : 42238210. Techniques de l'ingénieur.

Marilleau, N. et B. Gaudou. (2017). *MAPS10 - Modélisation multi-agents appliquée aux phénomènes spatialisés.* Présenté à MAPS 10, Saint Pierre d'Oléron, France.

Marsily (de), G. (1981). *Hydrogéologie quantitative*. Paris: Masson.

Mbonimpa, M., M. Aubertin, R. P. Chapuis, et B. Bussière. (2002). Pratical pedotransfer function for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering 20*, 235‑259.

Meylan, P., A.-C. Favre, et A. Musy. (2008). *Hydrologie fréquentielle: une science prédictive*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Miller, J. D., H. Kim, T. R. Kjeldsen, J. Packman, S. Grebby, et R. Dearden. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology 515*, 59‑70.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. (2013). *La taxe pour la gestion des eaux pluviales urbaines : Un outil au service des élus et de leur concitoyens*, p. 8.

Mitchell, V. G., H. Duncan, M. Inman, M. Rahilly, J. Stewart, A. Vieritz, et al. (2007a). *Integrated Urban Water Modelling - Past, Present and Future*, p. 8.

Mitchell, V. G., H. Duncan, M. Inman, M. Rahilly, J. Stewart, A. Vieritz, et al. (2007b). State of the art review of intergrated urban water models. In *Workshop 2*, p. 507‑514.

Monrose, J. (2017). Hydrologic performance of permeable pavement systems utilising various sub-base material for Caribbean applications. In *14th IWA/IARH Internatioal conference on urban drainage*, p. 1147‑1154. Prague.

Moura, P., S. Barraud, et F. Cherqui. (2007). *Rapport sur les indicateurs et sur les méthodes de constructions d'indicateurs de performances des ouvrages d'infiltration (Etape 2)* (No. Délivreable D-D2), p. 290. Villeurbanne, France: INSA LGCIE-DEEP.

Nash, J. E. et J. V. Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology 10*, 282‑290.

Navratil, O. (2015). MOOC - Des Rivières et des Hommes. Urbanisation et ajustements hydro-morphologiques. Enjeux, méthodes de diagnostic. Grenoble INP.

Nguyen, D. H. (2014). *Etude du comportement hydromécanique des bétons drainants à base de coproduits coquilliers*. (Thèse pour Doctorat). Université de Caen Basse-Normandie, Caen.

Nguyen, D. H., M. Boutouil, N. Sebaibi, L. Leleyter, et F. Baraud. (2013). Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Construction and Building Materials 49*, 151–160.

Nguyen, D. H., N. Sebaibi, M. Boutouil, L. Leleyter, et F. Baraud. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction and Building Materials 73*, 271‑282.

North, M. J., N. T. Collier, J. Ozik, E. R. Tatara, C. M. Macal, M. Bragen, et P. Sydelko. (2013). Complex adaptive systems modeling with Repast Simphony. *Complex Adaptive Systems Modeling 1*, 3.

OECD. (2013). *Water and Climate Change Adaptation*. OECD Publishing.

OECD. (2014). *Étude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation : La Seine en Île-de-France 2014 - Résumé executif*, p. 1‑27.

Oudin, H. (2008). Cours de Méthode des éléments finis. Ecole Centrale Nantes.

Pays de la Loire. (s. d.). *Les techniques alternatives en assainissement pluvial : descriptif et exemples de réalisation*, p. 38.

PDE Solutions Inc. (2017). FlexPDE 6 - Version 6.50. PDE Solutions Inc.

Petrucci, G. (2012). *La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines : confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique*. (Thèse pour Doctorat). Université Paris Est.

Piel, C., M. Pire, et L. Veiga. (2010). Le cycle de l'eau, élément structurant d'une ville durable, p. 9. Présenté à Novatech 2010.

Pooneh Maghoul. (2012). Thermo-Hydro-Mechanical Modeling in Porous Media - Part II : Validation. Unpublished.

Qin, Y. et J. E. Hiller. (2016). Water availability near the surface dominates the evaporation of pervious concrete. *Construction and Building Materials 111*, 77‑84.

Ragab, R., P. Rosier, A. Dixon, J. Bromley, et J. D. Cooper. (2003). Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation. *Hydrological Processes 17*, 2423‑2437.

Rakatoarisoa, M. M., C. Fleurant, A. Amiot, A. Ballouche, P.-Y. Communal, A. Jadas-Hécart, et al. (2014). Système multi-agent pour la modélisation des écoulements de surface sur un petit bassin versant viticole du Layon. *Revue internationale de géomatique 24*, 307‑333.

Ramier, D., E. Berthier, et H. Andrieu. (2011). The hydrological behaviour of urban streets: long-term observations and modelling of runoff losses and rainfall–runoff transformation. *Hydrological Processes 25*, 2161‑2178.

Reaney, S. M., L. J. Bracken, et M. J. Kirkby. (2006). Use of the Connectivity of Runoff Model (CRUM) to investigate the influence of storm characteristics on runoff generation and connectivity in semi-arid areas. *Hydrological Processes 21*, 894‑906.

Région Rhône Alpes. (2006). *Pour la gestion des eaux pluviales : Stratégie et solutions techniques*, p. 30. Lyon, France.

Reulier, R. (2015). *Structure paysagère et dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires. Approche par simulation multi-agents.* (Thèse pour Doctorat). Normandie Université, Caen, France.

Reulier, R., D. Delahaye, V. Viel, et R. Davidson. (2017). Connectivité hydro-sédimentaire dans un petit bassin versant agricole du nord-ouest de la France : de l'expertise de terrain à la

modélisation par Système Multi-Agent. *Géomorphologie : relief, processus, environnement 23*, 327‑340.

Robert, M. (1996). *Le sol: interface dans l'environnement ; ressource pour le développement*. Paris: Masson.

Roche, P.-A., J. Miquel, et E. Gaume. (2012). *Hydrologie quantitative: processus, modèles et aide à la décision*. Paris: Springer.

Rode, S. (2008). La prévention du risque d'inondation, facteur de recomposition urbaine ? *L'Information géographique 72*, 6‑26.

Rodriguez, F., H. Andrieu, et F. Morena. (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology 351*, 268‑287.

Roupsard, G. (1998). *Etude du climat littoral du Calvados et de ses composantes locales à des fins cartographiques et appliquées* (Mémoire de DEA), p. 50. Caen, France.

Salvadore, E., J. Bronders, et O. Batelaan. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology 529*, 62‑81.

Sanudo-Fontaneda, L. ., S. Charlesworth, D. Castro-Fresno, V. C. . Andrés-Valeri, et J. Rodriguez-Hernandez. (2013). Experimental pervious pavement parking areas in the North of Spain. Présenté à Novatech 2013. In *B1 - Revêtements poreux*, p. 1‑10. Lyon, France.

Schirmer, M., S. Leschik, et A. Musolff. (2013). Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in Water Resources 51*, 280‑291.

Servat, D. (2000). *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration et érosion.* (Thèse pour Doctorat). Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.

Service des Risques Naturels et Hydrauliques. (2014). *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, RAPPORTS de la Direction Générale de la Prévention des Risques*, p. 168. Paris, France.

Smith, G. M. (1991). Comparison of Stationary and Oscillatory Flow through Porous Media. *Department of Civil Engineering Queen's University Kingston, Ontario, Canada*.

Soutter, M., A. Mermoud, et A. Musy. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements*. Lausanne: Presses Polytechniques et Univ. Romandes.

Ta, A.-N. (2009). *Etude de l'interaction sol-atmosphère en chambre environnementale*. (Thèse pour Doctorat). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Taillandier, P., D.-A. Vo, E. Amouroux, et A. Drogoul. (2010). GAMA: A Simulation Platform That Integrates Geographical Information Data, Agent-Based Modeling and Multi-scale Control. In *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, p. 242‑258. Springer, Berlin, Heidelberg.

Tassin, B., M. Delbec, É. Gaume, M.-C. Gromaire-Mertz, A. Kanso, J.-M. Mouchel, et al. (2003). Les modèles pour la gestion des eaux urbaines. *Annales des Ponts et Chaussées 2003*, 27‑43.

Techniques de l'Ingénieur. (2013). Prévention du risque d'inondation. In *Techniques de l'ingénieur*. Paris, France: Edition T.I.

Tennis, P. D., M. L. Leming, et D. J. Akers. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association and National Ready Mixed Concrete Association.

Treuil, J. P., C. Mullon, E. Perrier, et M. Piron. (2001). Simulation multi-agents de dynamiques spatialisées. In *Modèles en analyse spatiale, sous la direction de Lena Sanders*, p. 105‑125.

Trzpit, J. P. (1965). *Atlas de Normandie*. Caen, France: Université de caen.

Tyler, S. W. et S. W. Wheatcraft. (1989). Application of Fractal Mathematics to Soil Water Retention Estimation. *Soil Science Society of America Journal 53*, 987.

Tyler, S. W. et S. W. Wheatcraft. (1990). Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research 26*, 1047‑1054.

United Nations, D. of E. and S. A., Population Division. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights* (No. ST/ESA/SER.A/352), p. 32.

Van Gent, M.R.A. (1993). *Stationary and Oscillatory Flow through Coarse Porous Media*. TU Delft.

Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal 44*, 892.

Vauclin, M. et F. Habets. (2015). *40ème journées du GFHN*. Marne la Vallée.

Virely, B. (2017). *Artificialisation - De la mesure à l'action* (Analyse), p. 46. La Défence, France: Commissariat général au développement durable.

Wahyudi, I. (1998). *Ecoulement dans les sols granulaires saturés en régimes permanent et transitoire*. (Thèse pour Doctorat). Université de Nantes, Saint-Nazaire.

Webber, J. L., M. J. Gibson, A. S. Chen, D. Savic, G. Fu, et D. Butler. (2018). Rapid assessment of surface-water flood-management options in urban catchments. *Urban Water Journal 15*, 210‑217.

Wilensky, U. et W. Rand. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*. Cambridge, Massachusetts London, England: The MIT Press.

Winiarski, T. (2007). *Utilisation de méthodes géophysiques pour caractériser les bassins d'infiltration d'eaux pluviales.* (No. Délivrables D-A11), p. 7. Lyon, France: INSA LGCIE-DEEP.

Woods Ballard, B., S. Wilson, H. Udale-Clarke, S. Illman, T. Scott, R. Ashley, et R. Kellagher. (2015). *The SuDS Manual 2015* (Guide technique No. C753), p. 968. London: CIRIA.

Yin, J., D. Yu, Z. Yin, M. Liu, et Q. He. (2016). Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. *Journal of Hydrology 537*, 138‑145.

Yu, D. et T. J. Coulthard. (2015). Evaluating the importance of catchment hydrological parameters for urban surface water flood modelling using a simple hydro-inundation model. *Journal of Hydrology 524*, 385‑400.

Zhou, Q. (2014). A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water 6*, 976‑992.

GLOSSAIRE

A

ADOPTA	Association pour le Développement Opérationnel et la Promotion des techniques Alternatives en matière d'eaux pluviales.

C

CCL	Northwestern's Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Le CCL est un groupe de recherché dirigé par le professeur Uri Wilensky. Il a été fondé en 1995 à L'université de Tufts et est hébergé depuis l'an 2000 à L'université Nerthwestern.
CERTU	Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (Fusionné avec d'autres composantes du réseau scientifique de l'État Français en 2014 au sein du CEREMA, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association (UK)

D

DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement. Le portail DRIAS les futurs du climat a été développé par Météo-France, en collaboration avec les chercheurs des laboratoires français (CERFACS1, CNRM-GAME2, IPSL3) et en association avec des utilisateurs (collectivités territoriales, recherche, grands groupes industriels ou PME, bureaux d'études ou d'associations).

E

EDP	Équation aux dérivées partielles
EP	Évaporation potentielle. Semblable à l'ETP mais ne considère que l'évaporation et non la transpiration.
EPA	Environmental Protection Agency (Agence de protection de l'environnement des Etats-Unis)
ER	Évaporation réelle. Semblable à l'ETR mais ne considère que l'évaporation et non la transpiration.
ETP (PET)	Évapotranspiration potentielle. Valeur exprimée en mm d'eau qui traduit la quantité d'eau potentiellement évacuée par évaporation et transpiration des plantes pour des conditions données.
ETR (RET)	Évapotranspiration réelle. Valeur exprimée en mm d'eau qui traduit la quantité d'eau réellement évacuée par évaporation et transpiration. Elle diffère de l'ETP puisqu'elle tient compte de la quantité d'eau disponible.

F

FlexPDE	Non du logiciel utilisé pour l'écriture et la résolution du modèle *PermetAble*.

G

GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GRAIE	Groupe de Recherche, d'Animation technique et d'Information sur l'Eau.

I

IAHR	International Association of Hydraulic Research
IDF	Courbe Intensité-Durée-Fréquence
IRD	Institut de recherche pour le développement

IWA	International Water Association
L	
LID	Low-Impact Development
LIDAR	Light Detection and Ranging
Litto3D®	Modèle numérique altimétrique précis continu terre-mer réalisé en commun par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) et l'IGN (Institut Géographique Nationale).
M	
mH2O	Mètre de colonne d'eau (et ses dérivé, mmH2O, etc.). Unité de pression utilisée majoritairement dans ce travail qui exprime la pression sous la forme de la hauteur d'une colonne d'eau.
MNT	Modèle Numérique de Terrain
N	
Netlogo	Nom du logiciel utilisé pour le développement du modèle *PorousCity*
O	
ODD	Overview, Design concepts, and Details. Protocole de présentation des modèles de type SMA.
ONU	Organisation des Nations Unies
R	
RAM	Random-access memory
RCP	Representative Concentration Pathway. Les scénarios RCP sont quatre scénarios de trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300. Ces scénarios ont été établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour son 5ème rapport.
RP	Revêtement perméable (ou Structure à revêtements perméables)
S	
SAFRAN	Système d'analyse à méso échelle de variables atmosphériques près de la surface.
SAGE	Schémas d'aménagement et de gestion des eaux
SDAGE	Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux
SI	Système international. Système d'unité utilisé dans ce travail.
SMA	Système multi-agent
SUDS	Sustainable Urban Drainage System
V	
VECOP	Valorisation dE COProduits coquilliers marins en ECO-Pavé drainant
VECOPEXP	Valorisation dE COProduits coquilliers marins en ECO-Pavé drainant – EXPérimentation in-situ
VRD	Voirie et Réseaux Divers
W	
WSUD	Water Sensitive Urban Design
Z	
ZAC	Zone d'Aménagement Concerté

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 – Schématisation de la démarche du travail de thèse et des liens entre les deux échelles. 5
Figure 1.1 - Schéma de synthèse chronologique de l'évolution de la gestion des eaux pluviales dans l'assainissement urbain. Source principales d'information (CERTU, 2001; Petrucci, 2012). 8
Figure 1.2 – Schématisation des conséquences du degré d'urbanisation sur le bilan hydrologique (Grand Lyon, 2008b) 11
Figure 1.3 - Diagramme schématique des effets de l'imperméabilisation sur l'hydrogramme de débit à l'exutoire du bassin versant (CERTU, 2003) 12
Figure 1.4 – Schéma de synthèse des conséquences de l'urbanisation sur l'hydrologie urbaine (Grand Lyon, 2008a) 14
Figure 1.5 - Représentation des principales techniques alternatives (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2013) 17
Figure 1.6 - Bénéfices apportés par les techniques alternatives. D'après le rapport 'SUDS manual' du CIRIA (Woods Ballard et al., 2015) 18
Figure 1.7 – Évolution du nombre d'inondations majeures déclarées dans le monde de 1950 à 2010 (Jha et al., 2012) 20
Figure 1.8 – Conception et évacuation de l'eau dans les structures perméables en fonction de la perméabilité du sol (Beeldens et al., 2008) 25
Figure 1.9 – Schéma des différentes fonctions possibles pour les géotextiles utilisés dans les structures à revêtements perméables ; extrait de fiche technique. 26
Figure 1.10 - Exemples d'usages des revêtements perméables pour l'infiltration des eaux pluviales (Faleyeux, 2015) 27
Figure 1.11 - Conclusions du travail de SALVADORE sur les enjeux de la modélisation en hydrologie urbaine. Les limites identifiées sont reliées à leurs solutions actuelles ou à développer (Salvadore et al., 2015) 38
Figure 2.1– Photos des pavés drainant coquillés développés à l'ESITC Caen, et des matériaux utilisés dans leur formulation (Nguyen et al., 2013) 57
Figure 2.2 – Courbe granulométrique cumulée des gravillons utilisés pour le lit de pose des structures perméables représentées dans le modèle *PermetAble*. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart type des mesures expérimentales. 58
Figure 2.3 - Courbe granulométrique cumulée des graviers de la couche de fondation des structures perméables représentées dans le modèle *PermetAble*. Les barres d'erreurs correspondent à l'écart type des mesures expérimentales. 59
Figure 2.4 - Triangle de corrélation entre la texture du sol et sa perméabilité (Grand Lyon, 2008a) 62
Figure 2.5 – Courbes de rétention d'eau (CRE) décrites par la loi de VAN GENUCHTEN ajustée à partir des points prédits par le modèle de KOVACS modifié (KM). 67
Figure 2.6 – Géométrie et composition de la structure perméable modélisée dans le modèle *PermetAble* 69
Figure 2.7 - Représentation des différentes modélisations des pertes de ruissellement (CERTU, 2003) 70
Figure 2.8 - Modélisation des pertes par coefficient de ruissellement (Barraud et al., 2010) 70
Figure 2.9 - Amélioration du modèle de représentation du ruissellement avec l'utilisation de trois coefficients différents en fonction de la pluviométrie (Barraud et al., 2010) 72
Figure 2.10 - Photo du banc d'essai utilisé pour l'obtention des données expérimentales de calage et vérification du modèle *PermetAble*. 73
Figure 2.11 – Photos de détail du banc d'essai. (a) Photo de la structure simulée dans le banc d'essai (b) Photo de la plaque permettant de placer le drain (c) Photo du dessus des pavés en cours d'installation sur le lit de pose. 74
Figure 2.12 – Photos du simulateur de pluie. (a) Photo de l'ensemble du dispositif (b) Photo de la sortie de la pompe. 74
Figure 2.13 - Schéma de présentation du banc d'essai et des instruments de mesures utilisés 75
Figure 2.14 - Résultats de l'essai expérimentale de calage (a) du modèle *PermetAble* 77
Figure 2.15 - Résultats de l'essai expérimental de vérification (b1) du modèle *PermetAble* 78

Figure 2.16 - Résultats de l'essai expérimental de vérification (b2) du modèle *PermetAble* 78
Figure 2.17 – Résultats de l'essai expérimental de vérification (b3) du modèle *PermetAble* 79
Figure 2.18 - Résultats de l'essai expérimental de vérification (b4) du modèle *PermetAble* 79
Figure 2.19 – Essai de calage (a) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps 80
Figure 2.20 - Essai de vérification (b3) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps. *La courbe du débit d'entrée est tracée à partir des débits moyens pour lisser les oscillations et clarifier la lecture.* 81
Figure 2.21 - Essai de vérification (b2) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps 82
Figure 2.22 – Essai de vérification (b4) du modèle *PermetAble* - Hydrogrammes des débits entrant et sortant et du volume stocké en fonction du temps 82
Figure 2.23 - Carte topographique de la commune de Ouistreham, et de localisation des profils et sondages ayant permis la réalisation des coupes géologiques 85
Figure 2.24 - Coupe du littoral de Ouistreham à Colleville-Montgomery selon un axe Nord-Est Sud-Ouest d'après les données du RGEALTI de l'IGN 85
Figure 2.25 - Carte de l'évolution du bâti sur la commune de Ouistreham entre 1900 et 1975 86
Figure 2.26 - Profondeur de la nappe phréatique en période de très hautes eaux (hiver 2001) sur la commune de Ouistreham (DREAL Normandie, 2014) 87
Figure 2.27 - Carte de situation de la commune de Ouistreham, de la zone d'étude et représentation schématique du réseau de collecte des eaux pluviales de la commune de Ouistreham 88
Figure 2.28 - Carte d'estimation du risque d'inondation par submersion marine sur la commune de Ouistreham à partir de l'altitude du niveau marin (DREAL Normandie, 2014) 89
Figure 2.29 - Profondeur de la nappe à l'échelle du quartier *Riva Bella* lors de l'hiver 2001 (DREAL Normandie, 2014) 90
Figure 2.30 - Carte de localisation des puits d'infiltration sur le quartier *Riva Bella* 91
Figure 2.31 – Photos des conditions du levé de terrain. (a) Base DGPS placée sur la dune et (b) récepteur mobile placé sur un parking le long du boulevard Aristide Briand (Cardinal et al., 2017) 94
Figure 2.32 – Cartographie de l'ensemble des levés de point sur le quartier *Riva Bella* 95
Figure 2.33 - Carte des pentes à l'échelle du quartier *Riva Bella* 96
Figure 2.34 - Carte des écoulements par rue (A) basée sur les informations topographiques de la « BD TOPO de l'IGN », du « RGE ALTI 1 mètre ». (B) basé sur le MNT produit à partir du levé de terrain 97
Figure 2.35 – Carte de localisation et profil en long du Boulevard Maréchal Joffre selon le levé de points GPS 97
Figure 2.36 – Photo, coupe et carte de localisation montrant les zones de concentration des eaux pluviales au niveau du carrefour entre l'Avenue de Verdun, le Boulevard Aristide Briand 98
Figure 2.37 - Carte d'occupation du sol en termes d'usage à l'échelle du quartier *Riva Bella* 99
Figure 2.38 - Graphique de la répartition des usages d'occupation du sol à l'échelle du quartier *Riva Bella* 100
Figure 2.39 – Illustration des typologies de l'occupation du sol à l'échelle du quartier *Riva Bella* 100
Figure 2.40 - Carte d'occupation du sol en fonction du type de revêtement à l'échelle du quartier *Riva Bella*, exportation depuis Netlogo. 102
Figure 2.41 - Carte détaillée des types de revêtements de sol sur l'Avenue de Verdun 103
Figure 2.42 - Photographies de deux faciès de trottoirs sur l'Avenue de Verdun 104
Figure 2.43 - Carte de localisation des zones de concentration du ruissellement observées sur le quartier *Riva Bella*. 108
Figure 2.44 – Synthèse des principaux ensembles climatiques normands (Cantat et al., 2018) 110
Figure 2.45 : Carte des cumuls de précipitation annuel sur l'ex Basse Normandie d'après le DRIAS 111
Figure 2.46 : Carte du nombre de jours de gel moyen par an sur le Calvados d'après le DRIAS 112
Figure 2.47 - Diagramme ombrothermique de la station de Bernières-sur-Mer. Graphique réalisé d'après des données Météo France sur la période 2002-2016 (Cardinal et al., 2017) 112

Figure 2.48 – Nuage de points des précipitations journalières sur Caen en fonction du jour de l'année (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet) 115
Figure 2.49 – Pluie journalière en fonction du nombre d'occurrences des valeurs de précipitation 116
Figure 2.50 - Nuage de points des intensités des évènements sur Caen en fonction du jour de l'année (Source Météo France, station Caen-Carpiquet) 118
Figure 2.51 - Graphique Intensité-Durée des évènements pluviométriques de 2006 à 2017, comparés aux courbes intensité-durée-fréquence (IDF) construites à partir des coefficients de MONTANA pour la station Caen-Carpiquet. 119
Figure 2.52 – Nuage de points des cumuls de précipitation des séries évènements sur Caen en fonction du jour de l'année (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet) 121
Figure 2.53 - Représentation des évènements retenus sur le diagramme intensité-duré-fréquence (IDF) local (Courbe IDF tracé à partir des coefficients de MONTANA de la station Météo France de Caen-Carpiquet). 124
Figure 2.54 - Nuage de points de la typologie "évènements extrêmes". Représentation des évènements retenus en rouge. 125
Figure 2.55 – Hyétogramme de l'évènement du 25/06/2006, représentatif de la typologie dite « extrême » 126
Figure 2.56 - Hyétogramme de l'évènement du 22/07/2013, représentatif de la typologie dite « extrême » et utilisé comme donnée pluviométrique de référence pour l'ensemble des simulations des modèles *PermetAble* et *PorousCity*. 126
Figure 3.1 – Schéma de la représentation des structures perméables dans le modèle *PermetAble*. 129
Figure 3.2 – Schéma de la démarche de modélisation par éléments finis des écoulements en milieu poreux – D'après un cours de Hervé OUDIN (Oudin, 2008). 131
Figure 3.3 – Sortie du modèle *PermetAble*. Maillage de la géométrie modélisée à deux moments différents de la simulation. (a) Au début de la simulation (b) pendant la pluie, quand le front d'infiltration est situé dans le lit de pose 134
Figure 3.4 - Schéma d'ensemble des paramètres d'entrée du modèle *PermetAble*. 139
Figure 3.5 – Schéma des hypothèses de modélisation concernant la définition du domaine de modélisation de la structure perméable dans le modèle *PermetAble* 140
Figure 3.6 - Sortie graphique modèle *PermetAble*. Représentions des hydrographes des débits entrant et sortant (Scénario de référence). 143
Figure 3.7 - Sortie graphique du modèle *PermetAble* représentant le débit évaporé en fonction du temps (scénario de référence) (EP = $2{,}31 \cdot 10^{-8}$ m/s/m^2, structure de 2 mètres, soit un débit d'évaporation maximum de $4{,}62 \cdot 10^{-8}$ m^3/s.). 144
Figure 3.8 - Schématisation du rôle de la surface de diffusion du ruissellement (Runoff_surf = 50 cm). Image issue du modèle *PermetAble* représentant la valeur de teneur en eau sur tout le domaine de résolution (Scénario de référence). 145
Figure 3.9– Sorties du modèle *PermetAble* représentant la vitesse de filtration sur une partie du domaine zoomée autour du drain. (a) Pas de débit de drainage limite (b) Débit de drainage limite = 0,72 L/min. 146
Figure 3.10 - Schéma des conditions aux limites utilisées dans le modèle *PermetAble*. 148
Figure 3.11 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de la vitesse de filtration (vecteur q), zoom sur l'entrée du ruissellement (a) et sur le drain (b). 150
Figure 3.12 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution de h (gauche) et de θ *(droite)*. Zoom sur la partie supérieure gauche (entrée du ruissellement) à trois instants différents : t = 3237, 3771 et 3872 secondes. 151
Figure 3.13 – Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation à l'instant t = 3637 s, de h (a), θ (b), des composantes sur X et Y du vecteur q (c) et (d) sur l'ensemble du domaine (Scénario de référence). 152
Figure 3.14 – Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation des profils de h (a), H (b) et θ (c), sur la coupe 1 à l'instant t = 10800 s (Scénario de référence). Les lignes rouges représentent la hauteur de surface libre dans la fondation. 152

Figure 3.15 - Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation des variations de h (a), θ (b), K (c) et qy (d) en fonction du temps le long de la coupe 1 (Scénario de référence). Représentation de h_{max} et de qy maximum. 153
Figure 3.16 – Sorties du modèle *PermetAble*. Évolution des volumes en entrée et sortie de chaque couche (a), et des indicateurs hydrologiques (b) (Scénario de référence). 155
Figure 3.17 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution du volume stocké dans chaque couche et dans la structure en fonction du temps (Scénario de référence). Identification des volumes maximum. 156
Figure 3.18 - Sortie du Modèle *PermetAble*. Visualisation de la teneur en eau sur l'ensemble du domaine pendant le régime permanent. Essai de calage n°6, $CO_{drain} = 0{,}6$ (a) et essai de calage n°14, $CO_{drain} = 1$ (b). 160
Figure 3.19 – Schéma des ajustements progressifs des valeurs de $K_{min.}$ Les valeurs sont données dans l'ordre : béton drainant, gravillons, graviers. 161
Figure 3.20 – Résultat de l'analyse par régression linéaire multiple portant sur l'influence de K_{min}. Affichage de la valeur des coefficients normalisés pour chaque paramètre et pour chaque indicateur. La barre d'erreur correspond à l'intervalle de confiance à 95 %. 162
Figure 3.21 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution du stockage dans la structure au cours du temps (simulation de calage optimisée). 163
Figure 3.22 – Comparaison entre les hydrographes des débits drainés mesurés et simulés (échelle de gauche) et représentation de l'hydrographe du débit en entrée (échelle de droite) (essai de calage du modèle *PermetAble*) 164
Figure 3.23 –Représentation des valeurs de débit drainé modélisé en fonction des valeurs de débit drainé mesuré (essai de calage du modèle *PermetAble*) 165
Figure 3.24 - Comparaison des hydrographes d'infiltration modélisés et mesurés (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée modélisé (échelle de droite). Essai de vérification b1. 166
Figure 3.25 - Comparaison du stockage de l'eau dans la structure, modélisé et mesuré (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b1. 167
Figure 3.26 – Comparaison des hydrographes modélisés et mesurés (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b2. 168
Figure 3.27 - Comparaison de l'hydrogramme du débit infiltré modélisé et mesuré (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b3. 170
Figure 3.28 - Comparaison des hydrographes modélisés et mesurés (échelle de gauche) et visualisation du débit en entrée (échelle de droite). Essai de vérification b4. 171
Figure 3.29 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution des débits cumulés au cours du temps au moment de la fin de la pluie $t = 11479$ secondes (Simulation de référence pour l'analyse de sensibilité). 174
Figure 3.30 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de l'évolution du stockage cours du temps au moment de la fin du drainage $t = 18301$ secondes (Simulation de référence pour l'analyse de sensibilité). 175
Figure 3.31 –Indicateur 1. Influence des paramètres sur l'infiltration modélisée par le modèle *PermetAble*. 183
Figure 3.32 - Indicateur 2. Influence des paramètres sur le stockage maximum modélisé par le modèle *PermetAble*. 185
Figure 3.33 - Indicateur 3. Affichage de l'influence des paramètres sur le décalage temporel du pic de stockage 185
Figure 3.34 – Pourcentage du volume entrant évacué par évaporation, infiltration et par le drain et pourcentage du stockage maximum par rapport au volume entrant pour les différentes valeurs de K_s (fondation) testées. 187
Figure 3.35 – Coefficients normalisés de K_s (fondation) pour les principaux indicateurs. Résultat issus de la régression linéaire réalisée sur l'ensemble des paramètres explicatifs et descriptifs de l'analyse de sensibilité. 187

Figure 3.36 – Sorties du modèle *PermetAble*. Visualisation de la teneur en eau zoomée sur l'entrée du ruissellement dans la structure pour trois valeurs K_s (fondation). De gauche à droite, 0,1 m/s ; 0,01 m/s et 0,001 m/s. 188
Figure 3.37 – Schéma d'illustration de l'influence de K_s (fondation) sur le stockage dans la structure au moment du pic de stockage. (a) K_s (fondation) = 0,1 m/s et (b) K_s (fondation) = 0,001 m/s 188
Figure 3.38 – Sorties du modèle *PermetAble*. Comparaison de l'évolution du stockage dans la structure entre l'essai de référence de l'analyse de sensibilité et l'essai avec les paramètres des matériaux après calage. 190
Figure 3.39 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation des débits entrants et évacués par le drain au cours du temps. Graphique exporté à la fin de la pluie (Scenario de référence). 191
Figure 3.40 – Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation des débits cumulés entrant et sortant et du stockage au cours du temps. Graphique exporté à $t = 11589$ seconde (Scénario de référence). 192
Figure 3.41 - Graphique d'évolution des volumes stockés dans la structure et du débit entrant en fonction du temps (Scénario de référence). 198
Figure 3.42 - Graphique d'évolution des volumes stockés dans la structure et du débit entrant en fonction du temps. Zoom du début au pic de la pluie (Scénario de référence). 199
Figure 3.43 - Sortie du modèle *PermetAble*. Visualisation de la teneur en eau sur l'ensemble du domaine de modélisation au moment du pic de pluie (Scénario de Référence). 199
Figure 3.44 - Sortie du modèle *PermetAble*. Profil de teneur en eau dans la structure le long de la coupe n°1. Visualisation des volumes d'eau stockés par rétention (couches de surface) et par saturation (fondation). 200
Figure 3.45 – Évolution du volume évaporé (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios. 201
Figure 3.46 - Évolution du volume infiltré (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios. 203
Figure 3.47 - Évolution du volume drainé (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios (Graphique centré sur la période 50 -300 minutes). 204
Figure 3.48 - Évolution du volume total stocké dans la structure (échelle de droite) et du débit entrant (échelle de gauche) au cours du temps pour les différents scénarios. 205
Figure 3.49 – Comparaison du volume total de chaque processus hydrologique, exprimé en % du volume entrant, pour les différentes typologies d'événements pluvieux. 206
Figure 3.50 –Comparaison du volume maximum stocké dans les différentes couches de la structure pour les différentes typologies d'événements pluvieux. 207
Figure 3.51 – Comparaison du volume total de chaque processus hydrologique, exprimé en % du volume entrant, pour les différentes typologies de séries d'événements pluvieux. 208
Figure 3.52 – Comparaison des volumes d'eau stockés dans la structure en fonction de la série d'événement pluvieux. 208
Figure 3.53 – Sortie du modèle *PermetAble*. Teneur en eau à l'instant $t = 64832$ secondes, à différentes profondeurs dans la structure le long de la coupe situé à gauche de la structure. Série « courante ». 209
Figure 3.54 - Sortie du modèle *PermetAble*. Débit cumulés tracés en fonction du temps de $t = 0$ à $t = 73730$ secondes. Série « courante » 209
Figure 3.55 - Schéma de modélisation conceptuelle des revêtements perméables, construit sur la base des résultats du modèle *PermetAble*. 211
Figure 3.56 - Répartition des processus hydrologiques des structures perméables en % de la pluviométrie annuelle. 215
Figure 4.1 – Présentation synthétique de la démarche de modélisation multi-agents, d'après la formation du réseau MAPS (Marilleau et Gaudou, 2017) 221
Figure 4.2 - Visualisation de l'interface graphique du modèle *PorousCity*. En gris, les boutons, en vert les objets qui permettent de définir des données d'entrée, en jaune les sorties du modèle sous forme numérique ou graphique, enfin la zone au centre est l'espace de visualisation du domaine de modélisation. 225
Figure 4.3 - Diagramme de classe présentant les trois entités utilisées dans le modèle *PorousCity* 228

Figure 4.4 - Diagramme d'activité du modèle *PorousCity* 231
Figure 4.5 – Représentation schématique de la modélisation des processus hydrologiques sur une cellule du modèle pour un pas de temps. La lettre qui précède le nom du processus renvoie à son ordre d'exécution. 232
Figure 4.6 - Schématisation de la décomposition des processus hydrologiques à l'échelle d'une cellule sans revêtement perméable ni puits d'infiltration. Les chiffres indiquent l'ordre d'exécution des processus. . 233
Figure 4.7 - Schématisation de la décomposition des processus hydrologiques à l'échelle d'une cellule avec puits d'infiltration. Les chiffres indiquent l'ordre d'exécution des processus. 235
Figure 4.8 - Schématisation de la décomposition des processus hydrologiques à l'échelle d'une cellule de type revêtement perméable. Les lettres et les chiffres indiquent l'ordre d'exécution des processus. 236
Figure 4.9 – Cartographie du type de revêtement de surface du bassin versant modélisé dans *PorousCity*. Les zones en vert clair correspondent aux espaces privés non considérés lors de la modélisation des processus hydrologiques. 238
Figure 4.10 – Sortie du modèle *PorousCity*. Graphique de visualisation du volume de chaque processus hydrologiques en fonction du temps pour l'ensemble du bassin versant. 240
Figure 4.11 – Sortie du modèle *PorousCity*. (a) Visualisation du nombre de cellules actives dans chaque catégorie de ruissellement. (b) Visualisation du nombre de cellules de type RP dans chaque catégorie. . 241
Figure 4.12 – Sortie du modèle *PorousCity*. Visualisation graphique de la hauteur de ruissellement sur les cellules actives par un dégradé de bleu. 241
Figure 4.13 - Schématisation des données d'entrée du modèle *PorousCity* 243
Figure 4.14 – Cartographie du type d'occupation du sol pour la configuration dite *Verdun* qui couvre une partie du bassin versant, zoomé autour de l'avenue de Verdun. 244
Figure 4.15 – Variation du volume total ruisselé et du temps de simulation en fonction de la valeur de *drops_nbr* 254
Figure 4.16 – Variation du nombre de cellules par catégorie de ruissellement en fonction de la valeur de *drops_nbr* 255
Figure 4.17 – Influence du paramètre *waters_nbr* sur les processus hydrologiques et la durée de la simulation. 256
Figure 4.18 - Influence du paramètre *waters_nbr* sur les processus hydrologiques et la durée de la simulation, en fonction du ratio de revêtements perméables implantés. 257
Figure 4.19 – Bilan hydrologique pour la simulation de calage $drops\_nbr = 4$, avec visualisation de l'écart type des résultats des processus hydrologiques. 258
Figure 4.20 - Représentation de la configuration du scénario de référence de la modélisation avec *PermetAble* dans le modèle *PorousCity*. 259
Figure 4.21 – Bilan hydrologiques de la simulation de vérification de la modélisation des structures perméables pour chaque événement pluvieux. 261
Figure 4.22 – Écarts entre les résultats des modèles *PermetAble* et *PorousCity* pour chaque processus hydrologique et pour chaque événement pluvieux. 261
Figure 4.23 – Comparaison des hydrogrammes de débits cumulés des processus hydrologiques modélisés par les modèles *PermetAble* et *PorousCity* pour l'événement de référence. 263
Figure 4.24 - Comparaison des hydrogrammes de débits cumulés des processus hydrologiques modélisés par les modèles *PermetAble* et *PorousCity* pour l'événement de référence. Débit d'infiltration calculé en tenant compte de la charge hydraulique. 264
Figure 4.25 – Cartographie de l'implantation des revêtements perméables sur le bassin versant pour les simulations d'analyse de la description du bassin versant. 266
Figure 4.26 – Coefficients normalisés montrant l'influence de la valeur d'interception des différents types de revêtements de sol sur les processus hydrologiques. 267
Figure 4.27 – Résultat des processus hydrologiques en fonction de la valeur de perméabilité du sol. 269
Figure 4.28 – Évolution du volume évacué par les puits d'infiltration et du ruissellement en fonction des choix de modélisation et de description des puits. 270

Figure 4.29 – Influence du volume de stockage maximum sur le volume stocké et infiltré par les puits d'infiltration (volume infiltré à la fin de la simulation et volume stocké maximum atteint pendant la simulation) 271
Figure 4.30 – Description de l'occupation du sol sur une sous-partie du bassin versant, zoomée autour de l'avenue de Verdun. (a) occupation du sol de référence (donnée *Riva Bella*). (b) occupation du sol détaillée (donnée *Verdun*)..... 272
Figure 4.31 – Comparaison du bilan hydrologique des simulations réalisées avec le jeu de données *Riva Bella* (référence) et avec le jeu de données *Verdun* (détaillé) sur une sous-partie du bassin versant zoomé atour de l'avenue de Verdun. La barre d'erreur représente l'écart type des résultats sur cinq simulations. 273
Figure 4.32 – Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution du volume total de ruissellement au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015. 275
Figure 4.33 - Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution de la hauteur d'eau de ruissellement maximum au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015. 275
Figure 4.34 – Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution du nombre de cellules actives dans les catégories de ruissellement (de 1 à 20 cm) au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015. 276
Figure 4.35 - Comparaison, en fonction de la valeur de perméabilité du sol, de l'évolution du nombre de cellules actives dans les catégories de ruissellement (de 1 à 20 cm) au cours de la simulation de l'événement du 11 juin 2015. 276
Figure 4.36 –Sortie du modèle *PorousCity*. Visualisation de la hauteur d'eau sur les cellules actives au moment de la fin de la pluie (volume de ruissellement maximum). Simulation de la pluie du 11/06/2015 avec $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s 278
Figure 4.37 – Comparaison de la localisation des hauteurs de ruissellement à la fin de la simulation de la pluie du 11 juin 2015 ($K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s) avec les observations de terrains. Fond de carte topographique du bassin versant..... 279
Figure 4.38 - Comparaison de la localisation des hauteurs de ruissellement à la fin de la simulation de la pluie du 11 juin 2015 ($K_s = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s) avec les observations de terrains. Fond de carte topographique du bassin versant..... 279
Figure 4.39 – Sortie du modèle *PorousCity*. Représentation de la hauteur d'eau ruisselée dans le cas de la modélisation avec $K_s = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Zoom sur le Boulevard Aristide Briand. 280
Figure 4.40 – Bilan hydrologique du scénario 'Référence', 6h après la fin de la pluie, pour les différentes typologies d'événements pluvieux modélisés (résultats exprimés en % du volume total de précipitation). 283
Figure 4.41 – Volume total des processus hydrologiques du scénario 'Référence', 6h après la fin de la pluie, pour les différentes typologies d'événements pluvieux modélisés (résultats exprimés en m^3). 283
Figure 4.42 - Bilan hydrologique du scénario 'Référence', 24h après la fin de la pluie, pour les différentes typologies d'événements pluvieux modélisés (résultats exprimés en % du volume total de précipitation). 285
Figure 4.43 - Bilan hydrologique des scénarios 'Trottoirs' et 'Référence' pour la pluie « extrême » de référence, 6h après la fin de la pluie (résultats exprimés en % du volume total de précipitation)..... 286
Figure 4.44 – Écarts de volume des processus hydrologiques des trois scénarios 'trottoirs' avec le scénario 'référence' (résultats exprimés en % du volume total de précipitation)..... 287
Figure 4.45 – Cartographie de l'occupation du sol pour le scénario 'RP Puits' avec une taille d'implantation des revêtements perméables de 20 mètres. 288
Figure 4.46 – Écarts de volume (exprimés en % du volume de précipitation) des processus hydrologiques entre le scénario de référence et les scénarios 'RP Puits' en fonction de l'événement pluvieux simulé et de la taille d'implantation des revêtements perméables. 289
Figure 4.47 – Cartographie de l'implantation des revêtements perméables pour le scénario 'RP bas et haut' en fonction du ratio de surface perméable et de la règle de localisation en fonction de l'altitude. 291

Figure 4.48 – Comparaison des volumes de ruissellement 6 heures après la pluie pour l'ensemble des simulations des scénarios 'RP bas et haut' en fonction du ratio de surface perméable et de la règle de placement (points bas/haut). 292
Figure 4.49 – Volume de ruissellement des scénarios d'étude de l'influence de la localisation tracés en fonction de chacun des indicateurs : (a) ratio de surface RP/surface imperméable, (b) taille des zones d'implantation de RP, (c) nombre de zone d'implantation de RP. 294
Figure 4.50 – Résultats de volume total infiltré par les revêtements perméables pour les différents scénarios de localisation tracés en fonction : (a) du ratio de surface RP sur la surface imperméable, (b) du nombre de zone d'implantation de RP. 295
Figure 4.51 – Résultats de volume total drainé par les revêtements perméables pour les différents scénarios de localisation tracés en fonction : (a) du ratio de surface RP sur la surface imperméable, (b) du nombre de zone d'implantation de RP. 296
Figure 4.52 - Résultats de volume total stocké dans la fondation des revêtements perméables pour les différents scénarios de localisation tracés en fonction : (a) du ratio de surface RP sur la surface imperméable, (b) du nombre de zone d'implantation de RP. 296
Figure 4.53 – Illustration de la répartition possibles du nombre de zones perméables en fonction de la surface imperméable drainée. 298
Figure 4.54 – Coefficients normalisés de l'analyse de régression linéaire portant sur les volumes de ruissellement, d'interception, d'évaporation, d'infiltration par les RP et de drainage par les RP en fonction des valeurs des propriétés des RP (maximum d'interception, maximum de stockage et perméabilité de surface) 300
Figure 4.55 – Volume de ruissellement en fonction de la valeur de perméabilité de surface 301
Figure 4.56 – Volumes de ruissellement de surface, et volumes infiltré, drainé et stocké par les revêtements perméables, tracés en fonction de la valeur du ratio dit de « dispersion » : *pp_imp_ratio / pp_size* 303
Figure 4.57 – Réduction du ruissellement exprimé en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable. 304
Figure 4.58 - Réduction du ruissellement exprimée en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable pour les différents événements pluvieux simulés (Scénario 'RP puits). 306
Figure 4.59 – Augmentation de l'infiltration exprimée en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable pour les différents événements pluvieux simulés (Scénario 'RP puits). 306
Figure 4.60 – Bénéfice net exprimé en pourcentage du volume de ruissellement du scénario de référence, tracé en fonction du ratio de surface de RP sur la surface imperméable. 307
Figure A.1- Définition des porosités ouverte et totale (Abdo, 2007) 351
Figure A.2 - Schéma représentatif des états de l'eau dans un milieu poreux (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015) 352
Figure A.3 – Formation des ménisques air-eau dans un milieu poreux. Les chiffres de 1 à 5 correspondent à des pores de plus en plus petits et donc des valeurs de succion de plus en plus grandes (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015) 354
Figure A.4 – Profil de saturation et de pression dans le sol (Marsily (de), 1981) 355
Figure A.5 - Représentation schématique de la différence entre vitesse de filtration (direction moyenne de l'écoulement) et vitesse réelle (trajectoire d'une molécule d'eau) (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015) 359
Figure B.1 - Courbe granulométrique des matériaux de colmatage utilisés (Nguyen, 2014) 362
Figure B.2 - Variation de la perméabilité des bétons drainants classiques en fonction du type de matériaux de colmatage (Nguyen, 2014) 363
Figure B.3 - Plan et photo du site expérimental d'Epron 364
Figure B.4 – Observations au microscope électronique du colmatage d'un pavé sur site. 365
Figure B.5 - Courbe granulométrique du sable éolien collecté sur le quartier *Riva Bella* 365
Figure B.6 – Deux séries indépendantes d'essais de colmatage avec du sable éolien. 366
Figure B.7 - Photos de l'essai de colmatage au sable éolien 367

Figure C.1 - Nuage de point de la typologie "évènements extrêmes". Représentation des évènements retenus en rouge. 369
Figure C.2 - Évènement pluviométrique du 25/06/2006 : intensité et cumul de précipitations. 369
Figure C.3 - Évènement pluviométrique du 22/07/2013 : intensité et cumul de précipitations. 369
Figure C.4 - Nuage de points de la typologie "évènements majeurs". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu 370
Figure C.5 - Évènement pluviométrique du 13/11/2010 : intensité et cumul de précipitations. 370
Figure C.6 - Nuage de points de la typologie "évènements sévères". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu 371
Figure C.7 – Évènement pluviométrique du 13/08/2011 : intensité et cumul de précipitations. 371
Figure C.8 - Nuage de points de la typologie "évènements occasionnels". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu 372
Figure C.9 - Évènement pluviométrique du 06/07/2008 372
Figure C.10 - Nuage de points de la typologie "évènements courants". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu 373
Figure C.11 - Évènement pluviométrique du 15/01/2008 373
Figure C.12 - Nuage de points de la typologie "évènements faibles". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu 374
Figure C.13 – Évènement pluviométrique du 17/11/2014 374
Figure C.14 - Nuage de points de la typologie "séries extrême". Représentation de la série retenue en rouge. 375
Figure C.15 - Série pluviométrique du 24/06/2006 au 26/06/2006 : intensité et cumul de précipitations. 375
Figure C.16 - Nuage de points de la typologie "séries majeures". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et des séries retenues 376
Figure C.17 – Série pluviométrique du 31/10/2013 au 12/11/2013 : intensité et cumul de précipitations. 376
Figure C.18 - Série pluviométrique du 11/08/2015 au 14/08/2015 : intensité et cumul de précipitations. 376
Figure C.19 - Nuage de points de la typologie "séries occasionnelles". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de la série retenue 377
Figure C.20 - Série pluviométrique du 04/07/2014 au 08/07/2014 : intensité et cumul de précipitations. 377
Figure C.21 - Nuage de points de la typologie "séries courantes". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de la série retenue 378
Figure C.22 - Série pluviométrique du 19/10/2016 au 21/10/2016 : intensité et cumul de précipitations. 378

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 – Synthèse de la comparaison des logiciels de modélisation verticale 43
Tableau 1.2 - Comparaison technico-économique des logiciels FlexPDE, FEFLOW et HYDRUS 44
Tableau 2.1 – Synthèse des données nécessaires pour les modèles *PermetAble* et *PorousCity* et renvoi vers les paragraphes de présentation des données respectives 53
Tableau 2.2 - Synthèse des propriétés physiques et hydrologiques des matériaux de la structure perméable et du sol modélisés dans le modèle *PermetAble* 55
Tableau 2.3 – Présentation des spécificités des composants et de la formulation du béton drainant d'après (Nguyen, 2014; Tennis et al., 2004) 56
Tableau 2.4 – Listes des essais de caractérisation des bétons drainants réalisés dans le cadre de la thèse de NGUYEN (Nguyen, 2014) et des objectifs à atteindre pour chaque propriété mesurée. 57
Tableau 2.5 - Présentation des propriétés à considérer pour la description du sol et de leur importance pour la réalisation de structures perméables. 61
Tableau 2.6 - Paramètres utilisés pour la description de la CRE des matériaux de la structure perméable et du sol 67
Tableau 2.7 - Synthèse des paramètres de description de la structure et de son environnement pour les modèles *PermetAble* et *PorousCity* 68
Tableau 2.8 - Exemples de valeurs de coefficient de ruissellement en fonction de l'affectation des sols. D'après (Barraud et al., 2010) 71
Tableau 2.9 - Détail des essais expérimentaux de vérification (b1, b2, b3 et b4) du modèle *PermetAble* 78
Tableau 2.10 – Synthèse et description des données utilisées pour représenter le bassin versant étudié, le quartier *Riva Bella,* dans le modèle *PorousCity.* 93
Tableau 2.11 – Description des différentes typologies d'occupation du sol du quartier *Riva Bella* et du revêtement de surface associé. 101
Tableau 2.12 – Description des évènements et de leurs conséquences observées sur le quartier *Riva Bella,* d'après les informations des comptes rendus de la mairie de Ouistreham. 106
Tableau 2.13 – Description des précipitations selon leurs conséquences. Adapté de (Lambert, 1995) 114
Tableau 2.14 – Classification des précipitations sur Caen à partir des données pluviométriques journalières (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet) 116
Tableau 2.15 - Classification des précipitations à partir des intensités des évènements (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet) 117
Tableau 2.16 – Classification des précipitations sur Caen à partir des cumuls de précipitation des séries d'évènements (Source : Météo France, station Caen-Carpiquet) 120
Tableau 2.17 – Méthodologie de classification de la pluviométrie locale 122
Tableau 2.18 - Classifications des précipitations retenues pour définir les typologies de pluviométrie locale sur Caen et ses environs 123
Tableau 2.19 – Liste des évènements ou séries d'événements climatiques utilisés pour les différents scénarios de modélisation 124
Tableau 2.20 – Synthèse des données présentant des spécificités ou des points d'attention particuliers à explorer par la modélisation 128
Tableau 3.1 – Hypothèses de modélisation du modèle *PermetAble* et leur déclinaison mathématique dans le modèle 133
Tableau 3.2 – Formulation mathématique et rédaction du code de modélisation des conditions aux limites. 149
Tableau 3.3 – Liste des indicateurs utilisés pour quantifier les résultats des simulations du modèle *PermetAble.* 154
Tableau 3.4 - Valeur de vitesse de filtration maximum pour les différents matériaux, calculée en fonction de leur diamètre de pore moyen. 157
Tableau 3.5 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b1. 166

Tableau 3.6 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b2. 168
Tableau 3.7 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b3. 169
Tableau 3.8 – Débits cumulés mesurés et modélisés et indice de NASH-SUTCLIFFE. Essai de vérification b4. 171
Tableau 3.9 – Valeur maximum de la composante verticale de la vitesse de filtration pour les essais de vérification 172
Tableau 3.10 - Résultats de la simulation de référence pour l'analyse de sensibilité du modèle *PermetAble*. 174
Tableau 3.11 – Liste des essais d'analyse de sensibilité réalisée et présentation des valeurs des paramètres utilisés. 177
Tableau 3.12 - Résultats des essais d'analyse de sensibilité. Pour la colonne *Vw_y_max* les valeurs de vitesse de filtration au-dessus du seuil de validité de l'hypothèse de modélisation ($Vw\_y\_max < 1 \cdot 10^{-4}$) sont indiquées en rouge. 179
Tableau 3.13 - Résultats des essais d'analyse de sensibilité comparés à l'essai de référence (Résultat essai – résultat référence). La coloration des cellules est proportionnelle à leur valeur, en vert de plus en plus foncé pour les valeurs positives et en rouge de plus en plus foncé pour les valeurs négatives. 181
Tableau 3.14 - Résultats de la simulation de référence pour la quantification des performances des RP. 191
Tableau 3.15 – Liste des événements ou séries d'événements climatiques utilisés pour les différents scénarios 192
Tableau 3.16 – Liste des scénarios modélisés et présentation des valeurs des paramètres utilisés. 193
Tableau 3.17 - Résultats des scénarios. Pour la colonne *Vw_y_max* les valeurs de vitesse de filtration au-dessus du seuil de validité de l'hypothèse de modélisation ($Vw\_y\_max < 1 \cdot 10^{-4}$) sont indiquées en rouge. 194
Tableau 3.18 - Résultats des scénarios comparés à l'essai de référence (Résultat essai – résultat référence). La coloration des cellules est proportionnelle à leur valeur, en vert de plus en plus foncé pour les valeurs positives et en rouge de plus en plus foncé pour les valeurs négatives. 195
Tableau 3.19 – Volume de rétention dans les couches de surfaces en fonction du débit entrant (Scénario de référence). 212
Tableau 3.20 – Répartition des processus hydrologiques en fonction de la typologie de pluie. % des jours et % de pluie obtenus à partir des données de pluviométrie journalières de Météo-France (station Caen-Carpiquet) pour la période 1945-2017. 215
Tableau 4.1 – Le protocole ODD, traduit de l'anglais d'après (Grimm et al., 2006) 226
Tableau 4.2 – Description des attributs des cellules correspondants aux paramètres fixés lors de l'initialisation 228
Tableau 4.3 - Détail des attributs des cellules correspondants aux résultats calculés par le modèle 229
Tableau 4.4 – Description de l'attribut des agents *drops* et *waters* 229
Tableau 4.5 – Variables globales de caractérisation des propriétés hydrologiques des cellules. 230
Tableau 4.6 - Variables globales correspondants aux règles d'implantation des revêtements perméables. 230
Tableau 4.7 - Variables globales de définition des valeurs de pluies et d'évaporation potentielle. 231
Tableau 4.8 – Valeurs des coefficients d'interception utilisés pour les différents types d'occupation du sol. 245
Tableau 4.9 – Règles de localisation des RP utilisées pour le calage de la variable *waters_nbr* 253
Tableau 4.10 – Ecart (en litres) entre le bilan hydrologique de *PorousCity* et de *PermetAble* pour chaque événement pluviométrique en fonction de la règle de calcul de l'infiltration 264
Tableau 4.11 – Valeurs des variables globales d'interception utilisées dans le plan d'expérience. 266
Tableau 4.12 - Synthèse des critères de corrélation de l'analyse de sensibilité sur les variables d'interception. 267
Tableau 4.13 – Scénarios simulés avec le modèle *PorousCity* pour comparer les bilans hydrologiques de différentes configurations d'aménagement 282

Tableau 4.14 – Valeurs données aux variables *pp_imp_ratio* et *pp_size* pour construire le plan d'expérience d'étude de l'influence du placement des revêtements perméables. 292
Tableau 4.15 – Bilan hydrologique (variables descriptives) et valeurs des indicateurs (variables explicatives) des simulations considérées pour l'étude de l'influence du placement des revêtements perméables. 293
Tableau 4.16 - Valeurs données aux variables *pp _interception*, *PP_max_storage* et *PP_Flow_in* pour construire le plan d'expérience d'étude de l'influence des propriétés des revêtements perméables. 299
Tableau 4.17 - Bilan hydrologique (variables descriptives) et valeur des indicateurs (variables explicatives) des simulations du plan d'expérience portant sur les propriétés des revêtements perméables. 299
Tableau 4.18 - Synthèse des critères de corrélation de la régression linéaire sur les résultats du plan d'expérience portant sur les propriétés des revêtements perméables. 300

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 2.1 – Loi de VAN GENUCHTEN 63
Équation 2.2 - S_r 64
Équation 2.3 - D_{eq} 65
Équation 2.4 - D_{eq} 65
Équation 2.5 - S_m 65
Équation 2.6 - D_h 65
Équation 2.7 - h_{co} 65
Équation 2.8 - S_c 66
Équation 2.9 – S_a 66
Équation 2.10 - $C\psi$ 66
Équation 2.11 – Débit de ruissellement 71
Équation 3.1 - Équation de RICHARDS 132
Équation 3.2 – $\theta(h)$ 132
Équation 3.3 – $K(h)$ 132
Équation 3.4 – Condition initiale sur h 137
Équation 3.5 - ER 144
Équation 3.6 - Drain 146
Équation 3.7 – Formule de GREEN-OSTROGRADSKI 149
Équation 3.8 – Q_{s_drain} 154
Équation 3.9 - V_{stock} 155
Équation 3.10 - V_{s_Inf} 155
Équation 3.11- Re 157
Équation 3.12 - Régression linéaire multiple 162
Équation 3.13 - NSE 165
Équation 3.14 – Réservoir de stockage 216
Équation 3.15 – Loi de DARCY 217
Équation 3.16 – Loi de FORCHHEIMER en régime permanent 217
Équation 3.17 – Loi de FORCHHEIMER en régime transitoire 217
Équation 4.1 – Équation bilan du ruissellement : cellule simple 234
Équation 4.2 – Équation réservoir : puits d'infiltration 235
Équation 4.3 – Équation bilan du ruissellement : cellule avec revêtements perméables 235
Équation 4.4 – Équation réservoir : Rétention dans les RP 236
Équation 4.5 – Équation réservoir : Stockage dans les RP 236
Équation 4.6 – Infiltration *via* les puits 251
Équation 4.7 – Calcul du débit d'infiltration en fonction de la charge hydraulique 263
Équation A.1 – Potentiel gravitaire 353
Équation A.2 – Potentiel de pression hydrostatique 353
Équation A.3 – Loi de LAPLACE 353
Équation A.4 – Potentiel de pression matricielle 354
Équation A.5 – Potentiel total 354

Équation A.6 – Charge hydraulique 355
Équation A.7. Équation de continuité 357
Équation A.8. Loi de NEWTON 357
Équation A.9. Loi de NAVIER-STOKES 357
Équation A.10. Équation d'EULER 358
Équation A.11. Équation de Bernoulli 358
Équation A.12 - Loi de DARCY 359
Équation A.13 – Perméabilité de DARCY 359
Équation A.14 – Nombre de REYNOLDS 360
Équation A.15. Équation de RICHARDS 360

ANNEXES

Annexe A. L'EAU DANS LES MILIEUX POREUX

Un milieu poreux est un milieu dit tri-phasique puisque potentiellement composé de trois phases, une solide, une liquide et une gazeuse. La description d'un milieu poreux repose d'une part, sur une connaissance précise de la phase solide, considérée invariante dans le cadre de ce travail, et d'autre part sur la connaissance de l'état et des variations de la phase aqueuse. Cette annexe commence par la caractérisation de la matrice solide avant de développer la description de la phase aqueuse et des mécanismes qui gouvernent le mouvement de l'eau.

CARACTÉRISATION DES MILIEUX POREUX, LA PHASE SOLIDE

Les milieux poreux sont des matériaux qui ont la particularité d'associer simultanément différentes phases. La matrice solide (phase solide) est généralement considérée comme l'invariant. Sa porosité détermine le volume et les caractéristiques de l'espace dévolu à la (ou les) phase(s) fluide(s)(Soutter et al., 2007). Cette phase « fluide » est généralement partagée en deux phases, une phase liquide et une phase gazeuse ce qui permet de décrire les milieux poreux comme un environnement tri-phasique (Roche et al., 2012). Ces trois phases peuvent être définies ainsi :

- **la phase solide ou squelette solide :** constituée par les particules minérales ou organiques de l'agrégat (granulats, matrice solide du béton, etc.) ;
- **la phase liquide :** constituée par l'eau qui occupe une proportion des vides de l'agrégat. Si tous les vides sont remplis, le milieu poreux est dit saturé ; sinon, il est dit non saturé ;
- **la phase gazeuse :** constituée par le gaz, essentiellement de l'air, qui occupe le reste des vides dans un milieu non saturé.

La coexistence, dans les matériaux poreux, de ces trois phases qui présentent des propriétés physiques et mécaniques très différentes explique la complexité de la description du comportement de chacune de ces phases. Complexité d'autant plus importante que la proportion entre phase liquide et gazeuse est variable au cours du temps, les deux phases fluides constituant les variables du système (Soutter et al., 2007).

La phase solide est caractérisée par la description de ses particules élémentaires (dimensions, formes, états de surface, natures chimique et minéralogique) et de leur arrangement. Un certain nombre de paramètres permettent de décrire la matrice solide (Cosandey et Robinson, 2012), ils peuvent être regroupés en deux descriptions, celle des particules et celle de leur arrangement :

- **la description des particules solides :** la masse volumique sèche ($\rho_s = M_s/V_s$), la granulométrie, la texture ;
- **la description de l'arrangement des particules :** la masse volumique apparente ($\rho_{as} = M_s/V_t$), la porosité totale ($n = [V_a+V_e]/V_t$), la porosité ouverte.

La caractérisation des particules solides s'appuie notamment sur l'analyse granulométrique (Chossat, 2005). Cette description granulométrique permet de déterminer la texture d'un sol en évaluant les proportions d'argile, limon et sable présents. Cette analyse peut être représentée par une courbe granulométrique cumulative ou par un triangle des textures, comme celui de l'USDA, qui détermine différentes catégories texturales.

Les trois intervalles granulaires seuils qui permettent cette description sont les suivants (Roche et al., 2012; Soutter et al., 2007):

- **éléments fins :** diamètre inférieur à 0.002 mm (Argile) ;
- **éléments intermédiaires :** diamètre compris entre 0.002 – 0.05 mm (Limon) ;
- **éléments grossiers :** diamètre compris entre 0.05 – 2 mm (Sable) ou supérieur à 2 mm (Gravier).

La structure de la matrice solide, ou arrangement des grains, peut être caractérisée par le serrage des particules ainsi que par l'existence éventuelle de directions préférentielles d'orientation des particules. Cet agencement des particules solides influence la micro et la macroporosité du sol (Chossat, 2005).À noter que la granulométrie influence fortement la porosité des milieux poreux. En effet, la porosité sera d'autant plus faible que la classification granulométrique sera étendue (Marsily (de), 1981). Ainsi, le diamètre efficace d_{10} (d_{10} représente le diamètre de grain tel que 10 % des éléments du milieu sont plus petits que d_{10}) est celui qui conditionne le plus la porosité du milieu.

De nombreux auteurs (Chossat, 2005; Marsily (de), 1981; Roche et al., 2012) soulignent l'importance de la définition de la porosité et de la prise en compte de sa complexité et de sa variabilité. Dans l'étude de la porosité, il convient de tenir compte de l'existence des vides et de leurs caractéristiques géométriques (tortuosité et connectivité) ainsi que de la façon dont les fluides qui occupent ces vides sont liés à la matrice solide (Marsily (de), 1981). Ceci conduit à distinguer différentes porosités dont la dénomination et la définition varie en fonction des auteurs :

- **la porosité totale :** qui représente l'ensemble du volume des vides par rapport au volume de l'échantillon : n ou $p = V_v/V_T$ (Chossat, 2005) ;
- **la porosité résiduelle :** composée des pores occlus qui ne communiquent avec aucun autre (Soutter et al., 2007), autrement dit la porosité des seuls pores non reliés (Chossat, 2005) ;
- **la porosité ouverte, ou porosité effective** (Soutter et al., 2007)**, ou porosité utile** (Soutter et al., 2007) **:** qui représente le rapport du volume des vides connectés entre eux au volume total de l'échantillon. Cette porosité pouvant être décomposée en une macroporosité ou porosité efficace et une microporosité ou porosité capillaire. Dans cette dernière le diamètre est suffisamment faible pour empêcher l'écoulement gravitaire de l'eau. Un diamètre équivalent de 10 à 30 µm est souvent admis comme limite entre les deux ;
- **la porosité de drainage** (Marsily (de), 1981) **:** définie comme le volume d'eau qui peut être extrait d'un milieu poreux par drainage par rapport au volume total ;
- **la porosité cinématique** (Marsily (de), 1981) **:** définie comme le volume d'eau qui s'écoule dans un milieu poreux saturé par rapport au volume total. Elle ne prend pas en compte le volume d'eau occupé par l'eau liée (considérée comme solidaire des particules solides), ni les volumes de pores non connectés aux réseaux de porosité ;
- **la porosité de fissure :** est un cas particulier de vides créés par les mouvements tectoniques et autres contraintes. Ces fissures (failles, diaclases) s'organisent généralement autour de deux axes de fissurations principaux.

Figure A.1- Définition des porosités ouverte et totale (Abdo, 2007)

Dans le cadre de ce travail, la dénomination de porosité ouverte sera retenue pour désigner les vides accessibles à l'eau pour sa circulation et son stockage. La porosité totale sera considérée seulement pour décrire les matériaux (notamment le béton).

D'autres paramètres interviennent également pour décrire la matrice solide : la surface spécifique, la tortuosité, l'isotropie/anisotropie (Chossat, 2005). La tortuosité τ [-] se réfère au fait que les pores ne sont pas rectilignes à l'intérieur du milieu. Elle s'exprime comme le rapport entre la longueur directe l [L] et la longue réelle l' [L] : $\tau = l'/l$. Plus la tortuosité est élevée plus la perméabilité est faible. La connaissance de l'isotropie/anisotropie est importante pour la compréhension du milieu. Dans un sol des directions privilégiées d'écoulement sont courantes.

LES DIFFÉRENTS ÉTATS ET INTERACTIONS DE L'EAU DANS UN MILIEU POREUX

En préambule aux sous-sections suivantes, les principales propriétés des fluides et les abréviations utilisées sont rappelées ci-dessous :

- **Masse volumique :** ρ [M·L^{-3}] ;
- **Pression de vapeur :** plusieurs pressions permettent de décrire la présence d'eau dans l'air.
  p_{vs} [M·L^{-1}·T^{-2}] la pression de vapeur saturante, soit la pression partielle de vapeur dans l'air saturé en vapeur.
  p_{ve} [M·L^{-1}·T^{-2}] la pression de vapeur existante, soit la pression de vapeur dans l'air à un temps donné.
  $p_{ve}/p_{vs} = Hr$ [-] l'humidité relative de l'air.
  À noter que le point de rosée est défini comme la température à laquelle la p_{ve} est égale à p_{vs}. Température à laquelle a lieu la condensation de la vapeur d'eau ;
- **Tension superficielle :** σ [M·T^{-2}] représente la différence d'énergie interne et superficielle de la surface d'un liquide ;
- **Viscosité :** deux viscosités sont définies ici, elle recouvre la même réalité exprimée respectivement pour une analyse en dynamique (qui prend en compte la masse) ou en cinématique.
  μ [M·L^{-1}·T^{-1}] représente la viscosité dynamique d'un fluide.
  $\nu = \mu/\rho$ [L^2·T^{-1}] représente la viscosité cinématique d'un fluide.

LES ÉTATS DE LIAISON DE L'EAU DANS UN MILIEU POREUX

Dans le cadre de ce travail, l'eau présente dans le milieu poreux est considérée en fonction de sa capacité de mobilité par rapport à la matrice solide, autrement dit, du type de liaison entre phase

liquide et phase solide. Ces liaisons peuvent intervenir à des degrés d'énergie très différents. Communément, trois états de l'eau dans un milieu poreux sont ainsi distingués dans la littérature (Chossat, 2005; Cosandey et Robinson, 2012; Marsily (de), 1981). Ils sont représentés sur la Figure A.2.

- **L'eau hygroscopique ou adsorbée ou encore eau liée :** retenue à la surface des grains par des forces d'adhésion moléculaire et électrique. Elle ne peut pas être mobilisée par les forces de succion. Elle ne transmet pas les pressions.
- **L'eau capillaire ou pendulaire :** retenue par les forces de contact dont font partie les forces capillaires. Cette eau couvre les particules solides d'une pellicule relativement continue. Elle se déplace dans le sol sous l'effet des potentiels hydriques mais est insensible à l'action de la gravité. Une large proportion de cette eau peut être extraite par évapotranspiration. Elle se trouve alors en dépression par rapport à la pression atmosphérique. C'est ainsi que les nappes à surface libre dans les sols fins sont généralement surmontées d'une frange capillaire.
- **L'eau gravitaire ou funiculaire :** circule sous l'action de la gravité. Elle remplit les pores les plus gros et transmet la pression hydrostatique.

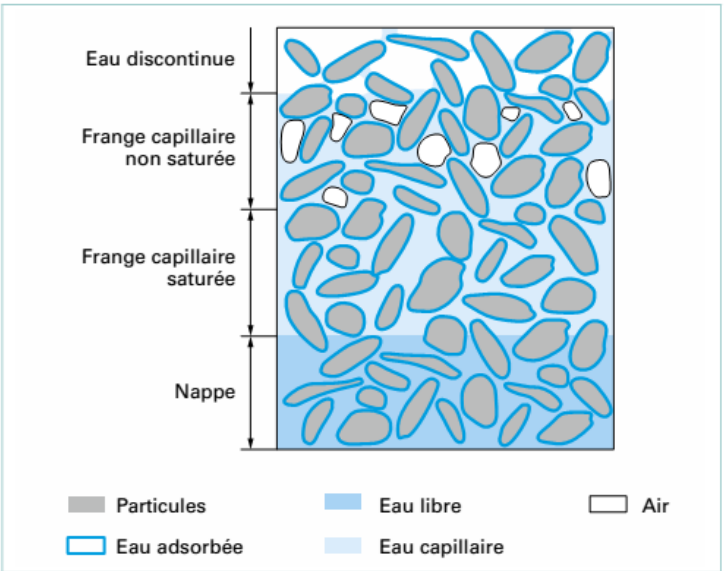


Figure A.2 - Schéma représentatif des états de l'eau dans un milieu poreux (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015)

L'ÉTAT ÉNERGÉTIQUE DE L'EAU DANS UN MILIEU POREUX

L'énergie de l'eau qui circule est présente essentiellement sous deux formes :

- **énergie potentielle :** correspond à l'énergie que possède un corps placé dans un champ de force. L'eau dans le sol se déplace des points de potentiel les plus élevés vers les plus faibles. Ce n'est donc pas tant les valeurs absolues qui sont importantes mais les valeurs relatives entre deux points ;
- **énergie cinétique :** résulte d'un déplacement de masse du fluide ou d'une variation de la température. Elle peut être négligée si les vitesses de déplacement restent faibles.

L'hypothèse d'une vitesse de déplacement faible est fréquemment admise dans les milieux poreux, comme le sol, où la perméabilité est généralement en dessous de $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Dans la

suite de ce travail l'énergie cinétique sera négligée et l'énergie totale sera résumée à l'énergie potentielle.

L'énergie potentielle correspond en un point donné à la somme de différents potentiels : le potentiel de gravité Φ_z [M·L^{-1}·T^{-2}] ; le potentiel de pression Φ_p [M·L^{-1}·T^{-2}] et le potentiel osmotique Φ_o [M·L^{-1}·T^{-2}] (négligé par la suite). La combinaison de ces forces détermine en chaque point l'énergie potentielle, ou potentiel hydrique total de la molécule d'eau considérée(Cosandey et Robinson, 2012).

Le potentiel gravitaire est lié à l'attraction terrestre. Il décroit en s'écartant du centre de la terre et tend à faire circuler l'eau de haut en bas. Sa valeur est déterminée par une différence altimétrique par rapport à une référence, généralement la surface du sol.

Équation A.1 – Potentiel gravitaire

$$\boldsymbol{\Phi_g = \rho \cdot g \cdot z}$$

Avec g [L·T^{-2}] la constante gravitationnelle ($g = 9.81$ m.s^{-2}) et z [L] l'altitude mesurée à partir d'une référence.

Le potentiel de pression peut être positif ou négatif. Un potentiel de pression positif se développe dans les zones saturées, au-dessous du niveau d'eau (toit de nappe par exemple). Ce potentiel de pression est appelé pression hydrostatique.

Équation A.2 – Potentiel de pression hydrostatique

$$\boldsymbol{\Phi_p = \rho \cdot g \cdot h}$$

Avec h [L], la hauteur de la colonne d'eau.

Un potentiel de pression négatif se développe dans les zones non saturées, il tend à attirer l'eau des points les moins secs vers les plus secs. Il résulte des forces de capillarité et d'absorption dues à la matrice solide. On parle ainsi généralement de potentiel de pression capillaire ou matricielle. Dans la suite de ce travail, seules les forces de rétentions capillaires seront considérées. Ces forces résultent de la tension de surface entre l'air et l'eau du sol qui est liée à la différence entre la pression de l'air et la pression de l'eau (Cosandey et Robinson, 2000). Cette différence de pression est fonction des rayons de courbure de chaque côté du ménisque de séparation des deux fluides. Cette relation est exprimée par la loi de LAPLACE et dans un tube capillaire ce potentiel de pression s'écrit :

Équation A.3 – Loi de LAPLACE

$$\boldsymbol{\Phi_p = p = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos \beta}{r} + \rho \cdot g \cdot (h_j - h)}$$

Avec :

- P [M·L^{-1}·T^{-2}] la pression interstitielle ;
- β [-] l'angle de contact du liquide sur la surface ($\alpha = 0°$ entre l'eau et argile, 180° entre l'eau et la matière organique) ;
- r [L] le rayon du capillaire ;
- h [L] la hauteur au-dessus de la surface libre ;
- h_j [L] la hauteur maximale de l'ascension capillaire (calculée par la loi de JURIN $h_j = 2 \cdot \sigma_w \cdot cos\ \alpha / \rho \cdot g \cdot r$).

En remplaçant h_j par son expression dans l'équation 3, le potentiel de pression matricielle prend la même forme que celui de la pression hydrostatique :

Équation A.4 – Potentiel de pression matricielle

$$\boldsymbol{\Phi_p = \rho \cdot g \cdot h}$$

Avec h [L], la hauteur au-dessus de la surface libre.

Dans un milieu poreux ce potentiel de pression se manifeste dans l'ensemble de la zone non saturée, il représente l'affinité globale de l'eau pour l'ensemble de la matrice solide et est parfois exprimé par la notion de succion matricielle (ou capillaire) Ψ[L] = - h (Biarez et al., s. d.).

La Figure A.3 présente une visualisation de la pénétration de l'air dans un sol granulaire initialement saturé qu'on laisse sécher. L'air pénètre au niveau des plus gros pores affleurant à la surface du sol, au contact eau-air. L'augmentation de la succion se traduit par la diminution des rayons de ménisques, qui s'insinuent dans des pores de plus en plus petits, suivant les contours 1 à 5 représentés sur la figure. Chaque contour est caractérisé par une seule valeur de succion, et donc par un rayon de courbure qui lui est lié par la loi de JURIN. Les ménisques sont localisés dans les plus petits pores du squelette solide, aux contacts entre les grains ; plus le sol se s'assèche, plus les ménisques deviennent petits, avec un faible rayon de courbure qui engendre une forte valeur de la succion. Ainsi, la succion prend une valeur maximale quand on approche l'état complètement sec (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015).

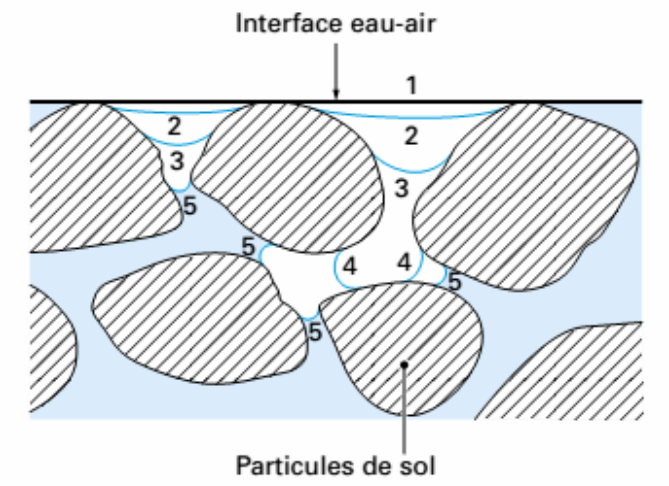


Figure A.3 – Formation des ménisques air-eau dans un milieu poreux. Les chiffres de 1 à 5 correspondent à des pores de plus en plus petits et donc des valeurs de succion de plus en plus grandes (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015)

LA CHARGE HYDRAULIQUE

D'un point de vue thermodynamique, l'énergie nécessaire à un processus naturel spontané tel que l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux provient d'une diminution du niveau énergétique du système. Ce principe se retrouve dans l'équation de NAVIER-STOKES qui permet de constater que l'état énergétique de la phase liquide en un point du sol et à un instant donné, soit son potentiel, se limite à des termes de pression et de gravité (Soutter et al., 2007).

Équation A.5 – Potentiel total

$$\boldsymbol{\Phi_{tot} = \Phi_p + \Phi_g = \rho \cdot g \cdot (h + z)}$$

La charge hydraulique H [L] représente ce potentiel total exprimé en mètre. Elle correspond à une pression exprimée en hauteur d'eau équivalente.

Équation A.6 – Charge hydraulique

$$\boldsymbol{H = h + z}$$

Le comportement de la phase liquide s'effectue en réponse aux variations de son potentiel. Les transferts s'effectuent dans la direction des potentiels décroissants et le taux de décroissance du potentiel total constitue la force motrice de l'écoulement.

Pour représenter la charge hydraulique un profil de charge peut être tracé. H étant la somme du profil de gravité (constant dans le temps) et du profil piézométrique (tensiométrique) stable à l'équilibre. Au cours d'un évènement pluvieux le profil d'équilibre va être modifié et un front d'infiltration de l'eau va se mettre en place si les forces gravitaires prennent le dessus sur les forces capillaires (Figure A.4).

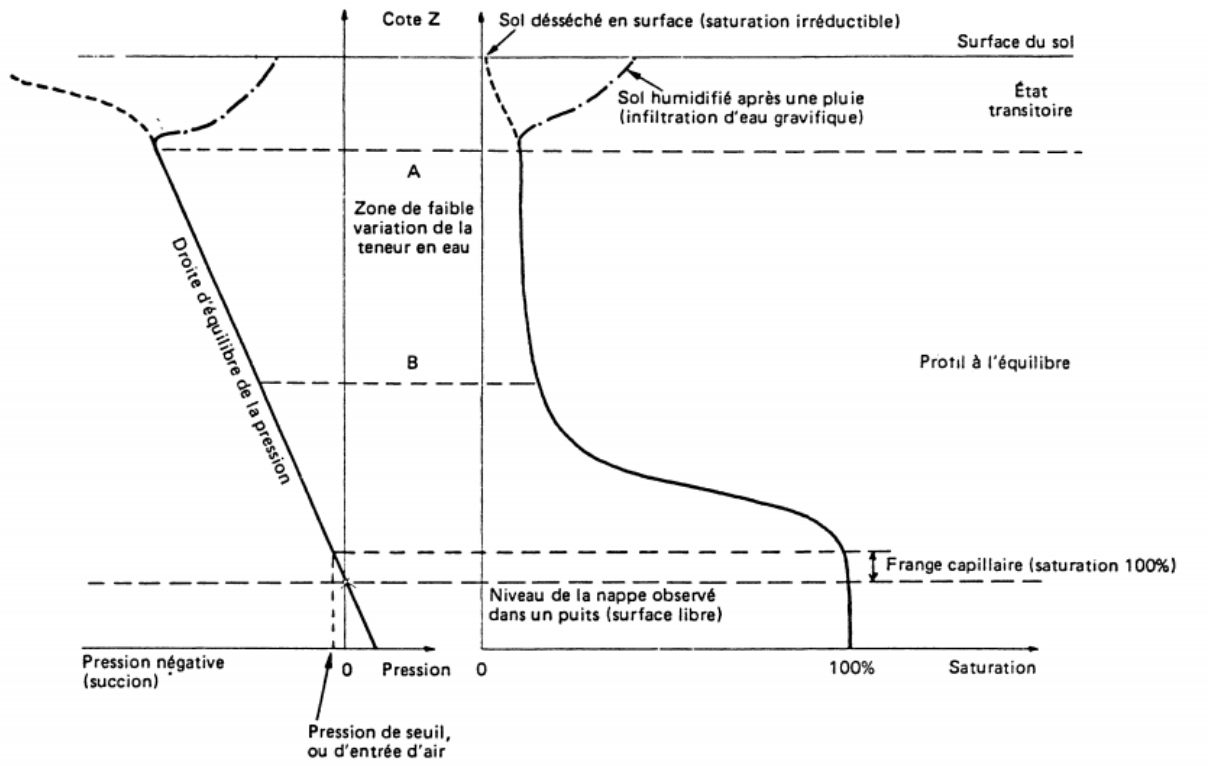


Figure A.4 – Profil de saturation et de pression dans le sol (Marsily (de), 1981)

LA TENEUR EN EAU

La teneur en eau volumique correspond au volume occupé par l'eau par rapport au volume total du matériau. Elle varie pour un milieu poreux entre la teneur en eau résiduelle θ_r [-] et la teneur en eau à saturation θ_s [-] (Soutter et al., 2007). Cette teneur en eau peut aussi être exprimée par un indice de saturation S_r [-] qui exprime la proportion du volume poral occupée par la phase liquide.

La teneur en eau constitue une variable d'état, soit une grandeur variable dans l'espace et le temps. Cette variabilité peut être décrite par un profil hydrique qui représente la distribution de la teneur en eau le long d'une verticale à un instant donné. La surface comprise entre deux

profils hydriques successifs représente un volume d'eau par unité de surface et peut donc s'exprimer comme une lame d'eau ou hauteur d'eau.

Pour la suite de ce travail trois teneurs en eau seuils sont définies :

- **la teneur en eau saturée θ_s :** correspond au volume maximum que l'eau peut occuper dans le milieu. Par la suite ce volume sera assimilé au volume de vide ouvert ;
- **la teneur en eau à rétention ou dite de capacité au champ θ_c :** correspond à la somme de l'eau liée et de l'eau de rétention capillaire. Elle est définie comme la quantité d'eau que peut retenir un milieu poreux avant que l'eau ne commence à s'écouler en profondeur sous l'effet des forces de gravité. Cette eau pourra être partiellement extraite par évapotranspiration ;
- **la teneur en eau résiduelle (ou point de flétrissement) θ_r :** correspond à la teneur en eau minimale au-dessous de laquelle l'eau ne peut plus être extraite du milieu poreux par évapotranspiration. Il s'agit donc de la valeur minimum de la teneur en eau.

LA COURBE CARACTÉRISTIQUE D'HUMIDITÉ

Du fait des forces d'attraction entre l'eau et la matrice solide, et des forces de cohésion entre les molécules d'eau, il faut pour extraire l'eau du sol, exercer une succion au moins égale à la succion capillaire exercée par les pores. Lorsque la teneur en eau d'un sol diminue, ce sont d'abord les pores de plus gros diamètres qui se vident. La succion qu'il faut exercer sur le sol pour continuer à extraire de l'eau restée dans les pores de plus petits diamètres augmente. Il existe donc une relation entre la teneur en eau θ et le potentiel matriciel de succion Ψ d'un sol. Plusieurs modèles génériques ont été proposés pour représenter cette relation tels que les fonctions analytiques suivantes de GARDNER, de BROOKS et COREY ou de VAN GENUCHTEN[30] (Roche et al., 2012).

Ces modèles sont basés sur l'identification de teneur en eau et de valeur de succion remarquables (seuils). Les teneurs en eau seuils ont été listées précédemment, les valeurs de succions seuils sont les suivantes :

- **le point d'entrée de l'air Ψ_0 :** correspond à la succion en deçà de laquelle le sol reste saturé. La valeur de Ψ_0 est déterminée par la taille des pores les plus gros ;
- **la succion résiduelle Ψ_r :** correspond à la succion pour laquelle la teneur en eau atteint θ_r.

Ces différents seuils permettent de définir trois différents états de l'eau dans le sol. L'eau libre, l'eau capillaire (appelée réserve utile en agrologie) et l'eau liée. Ces seuils dépendent essentiellement de la texture du sol et de sa teneur en matière organique.

La relation $\Psi = f(\theta)$ est appelée courbe caractéristique d'humidité du sol (ou courbe de rétention d'eau CRE), elle relie la charge de pression ($\Psi = -h$) et la teneur en eau θ. C'est une courbe spécifique à un milieu poreux donné en raison des influences spécifiques de la géométrie des pores (structure) sur les forces de capillarité et de la surface spécifique des particules solides (texture) sur les forces d'absorption (M Aubertin et al., 2003; Kovacs, 1981). Dans la

[30] Note : la fonction de VAN GENUCHTEN a l'avantage d'avoir une dérivée qui devient continue et proche asymptotiquement de zéro lorsqu'elle atteint la teneur en eau résiduelle et la saturation. Propriété intéressante dans les modèles numériques (Chossat, 2005).

gamme des faibles succions matricielles ($0 > h > -10$ m) ce sont les forces capillaires et la structure du sol qui sont prédominantes. La tendance s'inverse pour les fortes succions matricielles ($h < -10$ m) (Michel Aubertin et al., 2005; Godbout et al., 2004).

Lorsque la phase liquide d'un sol est à l'équilibre hydrostatique, le potentiel de pression matricielle varie linéairement avec la cote altimétrique. Si bien que le profil hydrique de la zone non saturée correspond alors à la courbe caractéristique d'humidité du sol.

Cette relation entre le potentiel de pression matricielle et la teneur en eau n'est pas univoque, les courbes diffèrent selon que le sol soit en phase de drainage ou d'humidification. Un phénomène d'hystérésis existe. Il s'explique essentiellement par les angles de contact entre zones de capillarité et matrice solide qui varient selon que le ménisque avance ou se retire et par la non uniformité géométrique des pores, qui se vidangent et se remplissent de façon brusque mais pour des seuils de résistance capillaire différents (Soutter et al., 2007). En effet, la succion matricielle nécessaire pour produire la vidange de pores d'un diamètre donné est supérieure à celle pour laquelle le même pore est capable de se remplir. Cette différence est d'autant plus prononcée que les valeurs de succions sont basses et que le matériel est grossier. Un des facteurs qui entre en jeu, dit de la bouteille d'encre, est lié au fait qu'une certaine quantité d'énergie est nécessaire pour permettre à l'air de pénétrer dans les pores, qui s'ajoute à celle requise pour en faire sortir l'eau, l'énergie nécessaire est donc plus grande en phase de dessèchement.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer la CRE d'un matériau (Godbout et al., 2004). Dans le cadre de cette étude la méthode développée par AUBERTIN a été retenue, elle est basée sur le Model de KOVACS (M Aubertin et al., 2003; Kovacs, 1981) et est présentée dans le chapitre 2.

LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LES MILIEUX POREUX

ÉQUATIONS ET PROPRIÉTÉS RELATIVES AUX FLUIDES

Les équations du mouvement d'un fluide s'obtiennent par l'application des principes généraux de la mécanique et de la thermodynamique (Soutter et al., 2007), les principes sont rappelés ci-dessous.

Le principe de conservation de la masse :

Équation A.7. Équation de continuité

$$\boldsymbol{div}(\boldsymbol{\rho} \cdot \vec{\boldsymbol{v}}) = -\frac{\boldsymbol{\partial \rho}}{\boldsymbol{\partial t}}$$

Le principe de conservation de la quantité de mouvement :

Équation A.8. Loi de NEWTON

$$\frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dt}}(\boldsymbol{m} \cdot \vec{\boldsymbol{v}}) = \sum \vec{\boldsymbol{F}}$$

Équation A.9. Loi de NAVIER-STOKES

$$\boldsymbol{\rho} \cdot \vec{\boldsymbol{g}} - \overrightarrow{\boldsymbol{grad}}(\boldsymbol{p}) + \boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{\nabla^2 \vec{v}} = \boldsymbol{\rho} \cdot \frac{\boldsymbol{d\vec{v}}}{\boldsymbol{dt}}$$

La loi de NAVIER STOKES peut être simplifiée en prenant des hypothèses sur les fluides et leurs mouvements. Hypothèse des fluides parfaits, absence de frottement (équation d'EULER), hypothèse d'un écoulement permanent, sans accélération (équation de BERNOULLI).

Équation A.10. Équation d'EULER

$$\boldsymbol{\rho \cdot \vec{g} - \overrightarrow{grad}(p) = \rho \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}}$$

Équation A.11. Équation de Bernoulli

$$\boldsymbol{\frac{v^2}{2 \cdot g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} = cste}$$

PERMÉABILITÉ (OU CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE) ET INFILTRABILITÉ (OU CAPACITÉ D'INFILTRATION)

Deux notions importantes sont à distinguer dans l'étude de la circulation de l'eau dans les milieux poreux ; la notion de perméabilité (ou conductivité hydraulique) qui décrit la capacité d'un milieu à laisser circuler un fluide, et la notion d'infiltrabilité (ou capacité d'infiltration) qui concerne la faculté d'un milieu à absorber un liquide. Ces notions sont fondamentales pour comprendre et expliquer les écoulements de l'eau dans les sols, qu'il s'agisse de sols non saturés ou saturés (Cosandey et Robinson, 2012).

L'infiltrabilité peut être définie comme le flux maximal que le milieu peut absorber à travers sa surface maintenue en contact avec de l'eau à la pression atmosphérique (Cosandey et Robinson, 2012). L'infiltrabilité est directement liée à la porosité. Cette capacité d'infiltrabilité va diminuer au cours d'un épisode pluvieux à mesure que la teneur en eau du milieu augmente et donc, que la capacité du milieu à absorber l'eau diminue. L'infiltrabilité est donc maximum pour une teneur en eau minimum et devient égale à zéro quand le milieu est saturé.

Inversement la perméabilité, notée K [$L \cdot T^{-1}$], traduit quant à elle la capacité du fluide à traverser le milieu (et non y être absorbé). Elle est minimum quand la teneur en eau est minimum et maximum quand le milieu est saturé. En effet, lorsque la teneur en eau diminue, les pores les plus gros se vident en premier. La section d'écoulement diminue rapidement de même que la vitesse moyenne d'écoulement en raison de la disparition des zones de vitesses les plus élevées situées au centre des pores. L'eau se voit alors contrainte de circuler le long des films d'hydratation qui épousent les contours des parois des pores vides ou, en plus grande quantité, dans le réseau formé par les pores de diamètres plus faibles et encore pleins qui contournent les pores vides. Dans les deux cas la longueur du cheminement parcouru et de ce fait la tortuosité s'accroissent. K dépend ainsi de la pression capillaire ou de la teneur en eau. Les formes de la relation $K = f(h)$ (ou $K = f(\theta)$) dépendent du sol considéré. Similairement à la CRE, diverses formes mathématiques sont fréquemment utilisées pour décrire ces courbes de conductivité hydraulique, comme les relations de GARDNER, de BROOKS et COREY ou de VAN GENUCHTEN (Soutter et al., 2007).

Lors d'un évènement pluvieux, il y a donc apparition d'un front d'infiltration qui se propage de haut en bas. Au fur et à mesure que la teneur en eau augmente dans le milieu, sa perméabilité augmente également et la pression augmente pour se rapprocher de zéro, permettant le mouvement de l'eau vers le bas. Le front progresse et mouille le milieu en dessous, continuant le processus. Se succèdent donc des phases d'humidification, d'infiltration, de redistribution, de retour vers l'équilibre puis d'équilibre hydrostatique (Marsily (de), 1981).

LA LOI DE DARCY

En 1856 l'ingénieur Henri DARCY publie les résultats de ses expérimentations d'infiltration de l'eau à travers une colonne verticale remplie de sable. Il définit une loi simple qui repose, comme celle de FOURIER, d'OHM ou de FICK, sur une relation linéaire entre un flux et un gradient de potentiel. Cette relation linéaire, uniquement valable pour les écoulements saturés, fait intervenir la perméabilité dite « saturée » K_s [L·T^{-1}] exprimée comme une vitesse (Roche et al., 2012).

Équation A.12 - Loi de DARCY

$$\vec{q} = -K_s \cdot \overrightarrow{grad}(h + z)$$

Le signe *« - »* dans cette relation signifie que la circulation de l'eau se fait, comme toujours, du potentiel le plus fort vers le potentiel le plus faible.

La loi de DARCY nous met en présence de trois vitesses :

- **la vitesse de filtration $\vec{q}$[L·T^{-1}] :** exprimée par le quotient Q/S (débit sur section) que DARCY appelle débit par unité d'air. C'est une vitesse moyenne qui n'a pas de réalité physique ;
- **la vitesse réelle de l'eau $\vec{v}$[L·T^{-1}] :** vitesse réelle du fluide qui circule dans la porosité du milieu ;
- **le coefficient de perméabilité K[L·T^{-1}] :** qui a la dimension d'une vitesse. Il représente la vitesse de filtration pour un gradient unité.

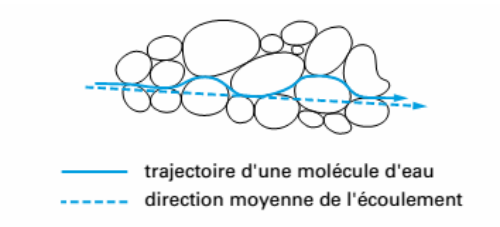


Figure A.5 - Représentation schématique de la différence entre vitesse de filtration (direction moyenne de l'écoulement) et vitesse réelle (trajectoire d'une molécule d'eau) (J.-P. Magnan, et P. Delage, 2015)

Par ailleurs, la perméabilité K utilisée par DARCY est liée à la perméabilité intrinsèque k [L^2] qui dépend à la fois du milieu et du fluide.

Équation A.13 – Perméabilité de DARCY

$$K = \frac{k \cdot g}{\nu}$$

Le fait de négliger l'énergie cinétique dans la définition du gradient hydraulique a pour conséquence de resserrer l'intervalle de validité de la loi de DARCY. Son domaine de validité se limite aux écoulements laminaires, soit pour des milieux poreux, à des écoulements de REYNOLDS Re [-] inférieurs à 1. Ce qui est généralement le cas avec des conductivités hydrauliques de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-8} m/s (Soutter et al., 2007). Cela oblige à porter une attention toute particulière aux milieux où les débits sont élevés (sols graveleux, karstiques, etc.). Dans le cadre de ce travail certains matériaux étudiés ont une perméabilité élevée (K égale ou supérieur à 10^{-3} m/s), il convient donc de garder particulièrement à l'esprit la question de la validité des équations utilisées.

Le nombre de REYNOLDS en milieu poreux est défini par l'équation 14 (Chossat, 2005) qui sera utilisée par la suite pour vérifier si les débits observés restent dans le domaine de validité de la loi de DARCY ($Re < 1$).

Équation A.14 – Nombre de REYNOLDS

$$\boldsymbol{Re = \frac{\vec{q} \cdot d}{\nu}}$$

Avec d [L] la dimension moyenne de taille de pore, parfois assimilée au diamètre moyen des grains ou au diamètre efficace d_{10} (Marsily (de), 1981).

L'échelle d'observation du milieu joue aussi un grand rôle. Ainsi la loi de DARCY est d'autant mieux vérifiée pour un milieu homogène et de grande dimension. En effet, cette loi est une relation empirique et macroscopique, valable uniquement pour un volume élémentaire représentatif suffisamment grand pour que les effets d'hétérogénéité puissent être moyennés. Ce n'est pas une loi microscopique qui tiendrait compte de la porosité et tortuosité exacte. Une perméabilité équivalente (K_{eq}) peut être utilisée pour caractériser dans son ensemble un milieu non homogène. Trois méthodes de moyenne peuvent alors être utilisées (Chossat, 2005) :

- **la moyenne arithmétique :** pour un écoulement horizontal (différents milieux traversés en même temps) ;
- **la moyenne harmonique :** pour un écoulement vertical (traversée des couches successivement) ;
- **La moyenne géométrique :** en cas de biais ou de régime particulier (une distribution aléatoire de la perméabilité par exemple).

Dans la suite de ce travail, les milieux étudiés seront toujours considérés comme homogènes et isotropes.

GÉNÉRALISATION DE LA LOI DE DARCY, ÉQUATION DE RICHARDS

C'est RICHARDS (1931) qui le premier a tenté de généraliser la loi de DARCY aux milieux non saturés. Il a construit une loi, par analogie avec celle de DARCY, qui permet de représenter les écoulements en milieux saturés comme non saturés avec comme moteur du déplacement le gradient hydraulique, $\overrightarrow{grad}(h + z)$, h pouvant cette fois-ci prendre des valeurs négatives. Avec cette généralisation, la perméabilité K_s n'est plus une constante mais dépend de la teneur en eau θ (Roche et al., 2012).

Cette équation peut prendre deux formes selon que la variable est la teneur en eau (forme diffusive) ou la charge de pression (forme capacitive). La forme capacitive présente l'avantage d'être applicable à tout le domaine d'écoulement, qu'il soit saturé ou non, alors que la forme diffusive conduit à une indétermination dans la zone saturée où la teneur en eau est constante. La forme capacitive sera donc retenue pour la suite de ce travail.

Équation A.15. Équation de RICHARDS

$$\boldsymbol{div\left(K(h) \times \overrightarrow{grad}(h + z)\right) = \frac{\partial \theta(h)}{\partial h} \times \frac{\partial h}{\partial t}}$$

Enfin, il convient de rappeler pour terminer cette sous-section que l'écoulement de l'eau dans le sol est un problème d'écoulement simultané de deux fluides qui ne sont pas miscibles. L'air s'oppose dans un certain nombre de cas à la pénétration de l'eau. Par simplification, pour résoudre des systèmes complexes, les chercheurs abordent les effets de l'air lors de l'infiltration de l'eau dans le sol en les ignorant inconsciemment, alors que RICHARDS dans son hypothèse simplificatrice les avait consciemment écartés (Chossat, 2005). Ce point souligne un peu plus le fait que ces équations reposent sur de nombreuses hypothèses et ont une validité qui est limitée à un domaine restreint.

LES INTERACTIONS SURFACE-ATMOSPHÈRE ET L'ÉVAPORATION

L'évaporation (ou l'évapotranspiration en présence de végétation) est le moteur de la circulation de l'eau dans les milieux non saturés (Chossat, 2005). Pour l'étude de l'évaporation depuis les structures à revêtements perméables, deux notions doivent être dissociées, l'évaporation potentielle (EP) qui correspond à la capacité évaporatoire de l'air et l'évaporation réelle (ER) qui correspond au volume d'eau effectivement évaporée, elle est conditionnée par la quantité d'eau disponible dans le milieu poreux.

L'évaporation potentielle, ou demande évaporatoire, dépend essentiellement de deux facteurs : la quantité de chaleur à disposition et la capacité de l'air à stocker de l'eau. La quantité de chaleur disponible est étudiée au travers du bilan énergétique à la surface du milieu qui traduit le fait que le flux d'énergie perdu par la surface du sol au cours de l'évaporation est égal au flux apporté par rayonnement moins le flux d'énergie perdue par convection dans l'air et dans le sol. La capacité de l'air à stocker de l'eau est liée à l'humidité relative de l'air *Hr* définie précédemment, elle-même influencée par la température de l'air. Le vent joue également un rôle essentiel, l'évaporation potentiellement remplaçant au voisinage de la surface du sol l'air saturé par de l'air plus sec. Ces mouvements ont une influence directement sur l'humidité relative de l'air et par conséquent sur le processus d'évaporation.

L'évaporation réelle tient compte de la capacité du milieu poreux à répondre à la demande évaporatoire (évaporation potentielle) en fonction de l'eau disponible (la teneur en eau). Plus le milieu poreux est sec et plus les flux évaporés seront faibles. La porosité du milieu est également déterminante puisqu'elle va influencer sur sa capacité à retenir et à faire remonter l'eau par capillarité vers la surface (Ta, 2009). Concernant les revêtements perméables, une étude s'est intéressée à la modélisation de l'évaporation et confirme que la teneur en eau disponible dans les premiers centimètres est le paramètre qui influence le plus l'évaporation (Qin et Hiller, 2016).

Différents modèles existent pour estimer l'évaporation potentielle et l'évaporation réelle. Dans le cadre de ce travail l'EP est obtenue à partir de données régionales de Météo-France, calculées par la formule de PENMAN-MONTEITH. L'ER est estimée à partir de l'EP en tenant compte de l'eau disponible à la surface du sol ou des revêtements perméables.

Annexe B. LE COLMATAGE DES PAVÉS DRAINANTS ; MESURE EN LABORATOIRE ET OBSERVATIONS DE TERRAIN

En complément de la caractérisation du béton drainant, une attention particulière a été donnée à leur colmatage. En effet le risque de colmatage représente l'une des principales limites à l'utilisation des revêtements perméables quel que soit le contexte, et encore plus particulièrement dans le cas du site d'étude à Ouistreham en raison de la présence de sable éolien. Ce risque est également le premier cité par les collectivités, aménageurs ou praticiens rencontrés tout au long de ce travail de thèse. Cette annexe vise à apporter quelques éléments de réponse spécifiques aux pavés utilisés dans le cadre de cette étude. L'étude du colmatage des surfaces drainantes étant par ailleurs largement documentée dans la littérature (Chapitre 1).

Les observations présentées ici s'appuient en premier lieu sur les essais réalisés par Dang NGUYEN dans le cadre de sa thèse (Nguyen, 2014). Ces résultats ont été complétés dans le cadre de ce travail par l'observation du colmatage des pavés installés sur un des chantiers expérimentaux du projet VECOPEXP et par une étude spécifique du colmatage du béton drainant par le sable éolien présent à Ouistreham, réalisée dans le cadre du TIPE de Chloé MAGNIER encadré lors de ce travail de thèse.

LE COLMATAGE DES PAVÉS EN BÉTON DRAINANT COQUILLÉ

Dang NGUYEN a étudié le colmatage du béton drainant classique et coquillé dans son travail de thèse (Nguyen, 2014). Il a mesuré la perméabilité des pavés après des colmatages successifs par différents mélanges de particules fines et sable (Figure B.1). Ses principaux résultats sont repris ci-dessous (Figure B.2).

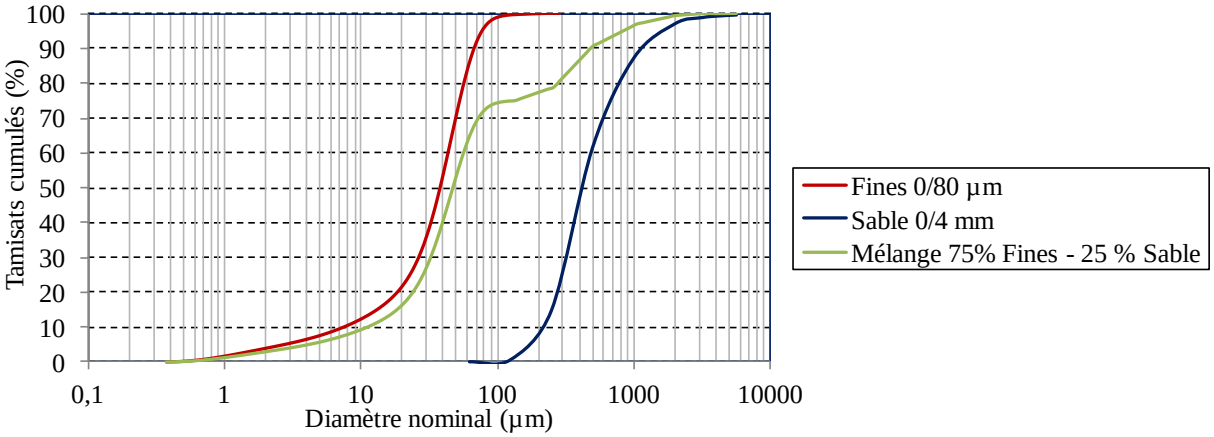


Figure B.1 - Courbe granulométrique des matériaux de colmatage utilisés (Nguyen, 2014)

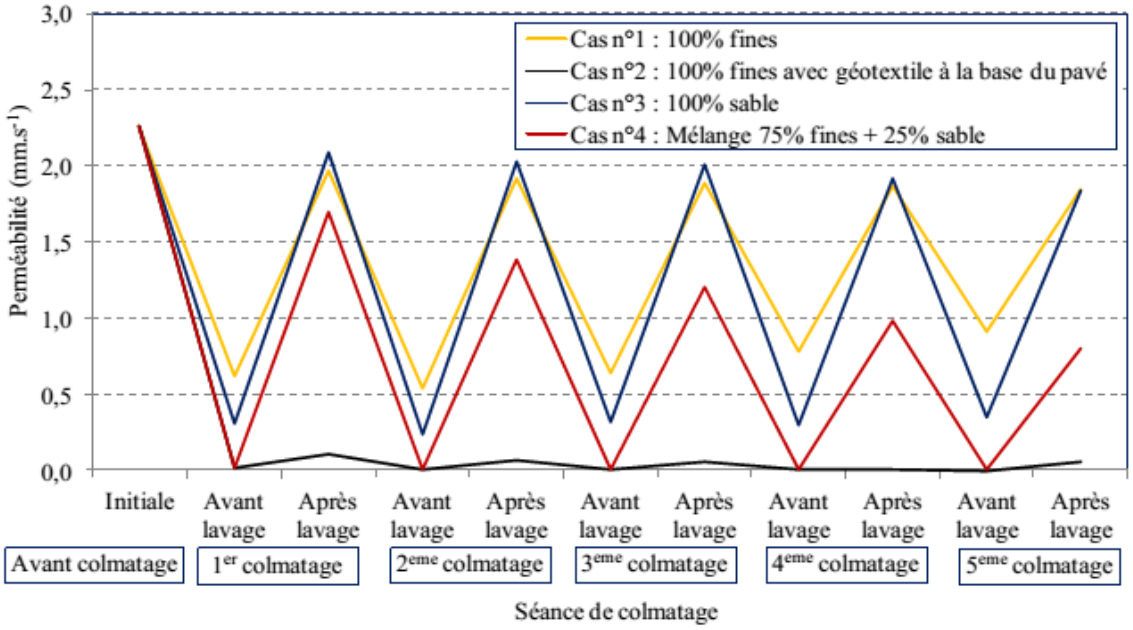


Figure B.2 - Variation de la perméabilité des bétons drainants classiques en fonction du type de matériaux de colmatage (Nguyen, 2014)

Lors d'un colmatage dû aux fines, ces dernière traversent facilement le béton drainant et entrainent donc un colmatage limité (60 à 70 % de perte de perméabilité). Le lavage du béton est très efficace et permet de retrouver jusqu'à 85 % de la perméabilité initiale. En cas de présence d'un géotextile à la base des pavés en béton le colmatage dû aux fines est beaucoup plus sévère, les fines s'accumulent sur le géotextile et vont remplirent les pores du béton en remontant à partir de la base entraînant une perte de perméabilité importante. Le lavage ne parvient pas dans ce cas à évacuer les fines qui restent piégés (Nguyen, 2014). Ce scénario est peu réaliste puisque les pavés de sont jamais posés directement sur un géotextile mais sur un lit de pose. Néanmoins, le même phénomène pourrait s'observer au niveau du lit de pose et entraîner le colmatage de ce dernier en cas de forte présence de fines.

Lors d'un colmatage par le sable la dynamique est différente. Contrairement aux fines le sable ne traverse pas le béton drainant et se retrouve piégé dans les premiers centimètres et ce bien que la majorité des grains de sable utilisés pour l'essai soient de taille inférieure à 1 mm (plus faible que la taille caractéristique des pores du béton drainant qui est de 3,3 mm dans ce cas). Après colmatage la perméabilité représente entre 10 à 20 % de la perméabilité initiale, après lavage la perméabilité du béton représente jusqu'à 90 % de la perméabilité initiale. De plus la perméabilité varie peu entre deux séquences de colmatage et lavage. Ces observations semblent indiquer que le sable entraine un colmatage réversible et qu'une action de lavage adaptée permet de maintenir une perméabilité satisfaisante dans le temps (Nguyen, 2014).

Enfin, le colmatage par un mélange de fine et sable affecte fortement la perméabilité du béton qui devient quasiment nulle après chaque séquence de colmatage. Dang NGUYEN observe que le dépôt de sable dans les premiers centimètres freine la pénétration des fines dans le béton qui remplissent et colmatent les pores. Le lavage à l'eau a dans ce cas une efficacité plus limitée, après 5 séquences de colmatage et lavage la perméabilité résiduelle ne représente que 36 % de la perméabilité initiale (0.81 mm/s contre 2.2 mm/s) (Nguyen, 2014).

Des résultats similaires ont été observés par différents auteurs, (Smith, 2006). Par ailleurs, Dang NGUYEN observe des résultats équivalents pour le béton drainant coquillé, avec une perte de perméabilité plus faible pour les bétons à base de coquilles Saint-Jacques et de pétoncles, la tortuosité induite par les coquilles piégeant les particules plus proches de la surface du pavé facilitant ainsi l'efficacité du lavage à l'eau (Nguyen, 2014).

OBSERVATION DU COLMATAGE IN SITU

Sur le site expérimental d'Epron (Figure B.3) une zone est particulièrement soumise au colmatage puisque qu'une bande de un mètre de pavé draine une surface imperméable d'environ 50 m^2. Les pavés sur cette zone particulière ont présenté un colmatage visible en surface après moins d'un an de service.

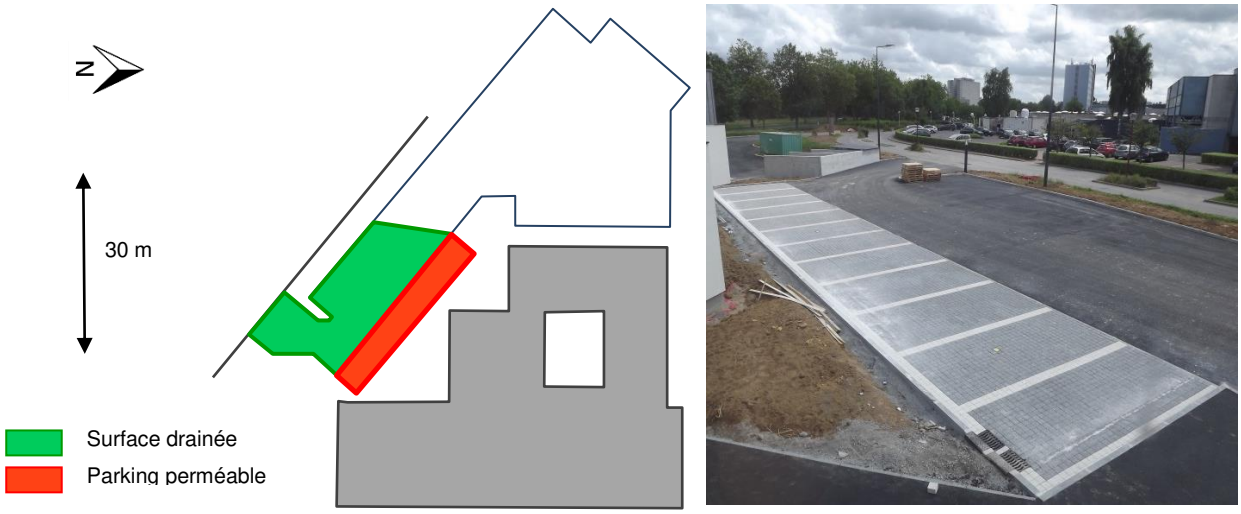


Figure B.3 - Plan et photo du site expérimental d'Epron

Le suivi dans le temps de cette zone spécifique met en évidence l'élargissement de la zone colmatée. Lors de fortes précipitations un ruissellement s'observe en surface des pavés colmatés jusqu'à atteindre la fin de la zone colmatée. Cela contribue progressivement à étendre cette zone. Cette observation permet de mettre en évidence qu'une structure perméable ne se colmate pas de façon homogène. Une conséquence pratique en terme d'entretien consiste à identifier les zones qui reçoivent les flux de ruissellements préférentiels et à concentrer les actions d'entretien sur ces zones. Ce qui peut réduire notablement l'ampleur des actions d'entretien, permettre d'augmenter leur fréquence et ainsi contribuer à améliorer la durée de vie de l'ouvrage.

Par ailleurs, un des pavés les plus sévèrement colmatés a été observé au microscope électronique après 18 mois de service pour illustrer le processus de colmatage. La Figure B.4 (a) permet d'observer que le colmatage se répartit en deux zones, la principale est en surface, dans les premiers centimètres du béton drainant, la seconde est située à la base du béton. Cependant, le colmatage du bas du pavé concerne seulement l'extérieur du pavé. Il est probablement dû à l'accumulation de matière entre les pavés plus qu'à des particules qui auraient traversé l'ensemble du pavé. Inversement, les premiers centimètres du pavé semblent bien colmatés par des particules qui sont piégées dans la porosité du béton. La Figure B.4 (b) zoome les premiers centimètres colmatés du pavé après 18 mois de service et illustre la comparaison avec un pavé de béton drainant « neuf ».

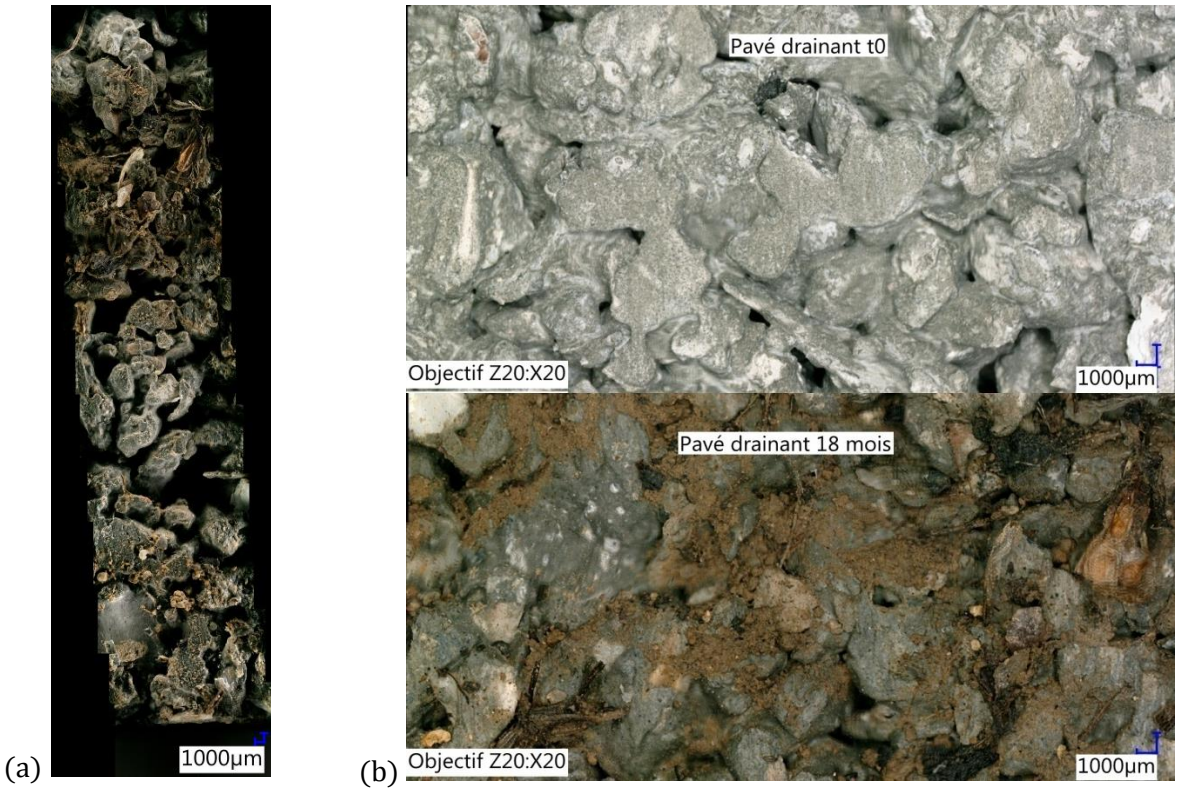


Figure B.4 – Observations au microscope électronique du colmatage d'un pavé sur site.

ÉTUDE EN LABORATOIRE DU COLMATAGE PAR LE SABLE ÉOLIEN

Des essais de colmatage par le sablé étolien de Ouistreham ont été réalisés dans le cadre de l'encadrement d'un travail de TIPE de Chloé MAGNIER.

Du sable éolien a été collecté en front de mer à Ouistreham au niveau de puisards privés récupérant les eaux de ruissellement en bas des pentes d'accès aux garages. La granulométrie du sable collecté est présentée sur la Figure B.5. Elle présente une taille dominante de grain avec 72 % du poids cumulé entre 63 et 315 µm. Ce matériau présente ainsi une granulométrie intermédiaire entre les fines et le sable utilisé par Dang NGUYEN dans sa thèse.

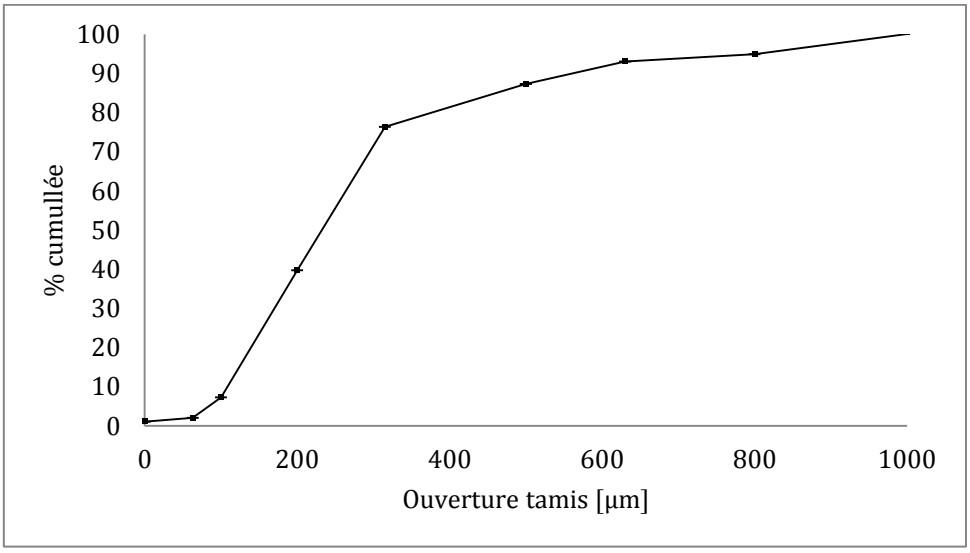


Figure B.5 - Courbe granulométrique du sable éolien collecté sur le quartier *Riva Bella*.

L'essai réalisé consistait à évaluer l'ordre de grandeur de la perméabilité d'un pavé via une mesure proche d'un essai de perméabilité à charge variable avec l'utilisation d'une colonne d'eau conçue dans le cadre du projet VECOPEXP. La couche de pavé est installée sur un lit de pose de 3 cm de gravillon, un géotextile et une couche de fondation de 4 cm de gravier. Le pavé étudié est colmaté à 5 reprises par ruissellement avec un mélange de 200 g de sable éolien et d'eau, l'essai est répété sur deux pavés différents et chaque mesure est répétée deux fois.

Ce procédé présente un certain nombre d'incertitudes liées d'une part à la technique de mesure (étanchéité entre la colonne et le pavé, précision de la lecture), d'autre part à la méthode de colmatage (le sable est peu dilué comparé à des conditions réelles). Par ailleurs, l'essai ne permet pas la mesure de la perméabilité saturée puisque le pavé n'est pas maintenu saturé lors de l'essai. Néanmoins, cette mesure permet de quantifier de façon relative la diminution de perméabilité des pavés à différents niveaux de colmatage. Les résultats obtenus pour chaque pavé sont présentés sur la Figure B.6. Les points tracés correspondent à la médiane, les barres indiquent les valeurs des résultats de chacune des mesures. Il ne s'agit pas ici de barres d'erreurs. Dans le cas du second pavé (en noir sur la Figure B.6) les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Dang NGUYEN pour le colmatage avec du sable avec une perméabilité comprise en 10 et 20 % de la perméabilité initiale après colmatage.

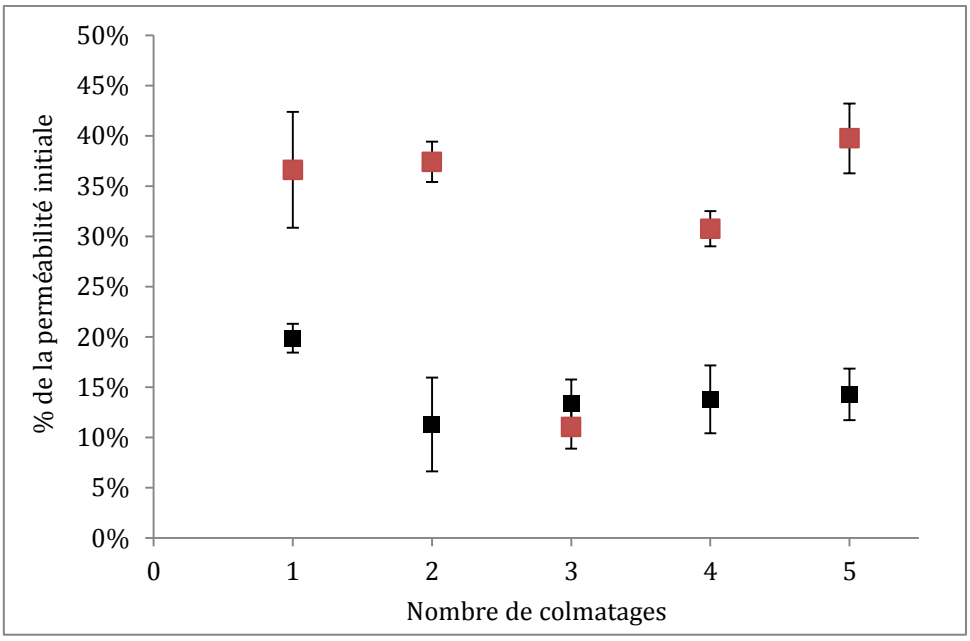


Figure B.6 – Deux séries indépendantes d'essais de colmatage avec du sable éolien.

Suite aux essais la répartition du sable dans le pavé et la structure a été observée. Le sable s'accumule en surface du pavé et ne le traverse pas (pas de présence de sable sous le pavé au niveau du lit de pose), cependant une quantité importante de sable s'infiltre entre les pavés et se dépose sur le haut du lit de pose. Ce sable reste alors majoritairement en surface du lit de pose, seules quelques traces de sable sont observées dans le lit de pose et seulement quelques grains au niveau du géotextile.

Figure B.7 - Photos de l'essai de colmatage au sable éolien

Le croisement de l'ensemble de ces observations et résultats permet de mettre en évidence deux situations différentes ; en présence de fine ou sans présence de fine.

1. Colmatage dû à du sable (0 – 4 mm), du sable éolien (0,06 – 1 mm) ou aux particules présentes sur le site expérimental d'Epron (non caractérisées).
    - Le colmatage se produit majoritairement en surface des pavés et dans les interstices entre les pavés. Les particules qui passent entre les pavés restent piégées en surface du lit de pose.
    - La perméabilité des pavés après colmatage par ces matériaux semble être comprise entre 10 et 20 % de la perméabilité initiale.
    - Les particules étant piégées en surface le lavage à l'eau des pavés est efficace pour les remobiliser et nettoyer les pavés. Une telle opération de maintenance permettrait de maintenir une perméabilité à hauteur de 65 % de la perméabilité initiale après cinq cycles de colmatage/nettoyage (Nguyen, 2014).
    - Le colmatage ne se produit pas de façon homogène, les zones recevant le ruissellement le plus important vont se colmater en premier. La progression du colmatage est visible en surface ce qui permet d'en suivre l'ampleur et d'intervenir de façon ciblée et ajustée.
2. Colmatage dû aux fines (0 – 80 µm) ou à un mélange contenant des fines.
    - Les fines traversent les pavés et entraîne un colmatage important au niveau du géotextile. Associées à des matériaux plus grossiers les fines aggravent le colmatage des premiers centimètres des pavés.
    - Le colmatage par des fines entraîne une perte de perméabilité plus importante et le nettoyage des pavés est moins efficace.

Ainsi, en l'absence de fine le colmatage pourra être considéré comme réversible et maîtrisable puisqu'il reste localisé en surface et peut ainsi être facilement observé, suivi et que des actions de maintenance sont efficaces. Inversement si les fines représentent la majorité des particules le colmatage pourra être considéré comme irréversible. Il se produit alors au niveau du géotextile et/ou dans les pavés et les actions de maintenance ont une efficacité plus limitée.

Toutes ces observations seraient à confirmer par des études plus poussées et à comparer avec les résultats donnés dans la littérature. Une telle étude du colmatage sort du cadre de ce travail de thèse.

Annexe C. PRÉSENTATION DES TYPOLOGIES PLUVIOMÉTRIQUES RETENUES

Les typologies définies au chapitre 2 (Section 2.4) sont détaillées ici à partir des données au pas de temps 6 minutes de 2006 à 2017 pour les séries et les évènements inférieurs à 25 mm et à partir des données journalières de 1945 à 2017 pour les évènements supérieurs à 25 mm.

Pour chaque typologie l'évènement (ou les évènements) retenus ont été choisis en s'appuyant sur la médiane et les 1er et 3ème quartiles de la variable majeure de chaque typologie (cumul de précipitations ou intensité) dans le but d'être le plus représentatif de leur typologie.

Les typologies sont regroupées en trois grandes catégories :

- les évènements supérieurs à 25 mm ;
- les évènements inférieurs à 25 mm ;
- et les séries d'évènements.

À noter que l'occurrence donnée pour chaque typologie correspond à l'occurrence qu'un évènement appartenant à la typologie survienne.

LES ÉVÈNEMENTS SUPÉRIEURS À 25 MM

LES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES

Définition : évènements avec un cumul de précipitations supérieur à 80 mm.
Occurrence : période de retour de 25 ans environ.
Saisonnalité : été et automne.

À noter que l'évènement du 22/07/2013 ne figure pas dans les données de la station Météo France de Caen-Carpiquet. En effet, la station Météo France a enregistré ce jour-là un cumul de précipitation de 20,7 mm alors qu'une station privée (à moins de 4 km de la station) a enregistré sur le centre-ville de Caen 83,6 mm. Cet évènement extrême a provoqué de fortes inondations du centre-ville de Caen (Beauchamp, 2014). Il a servi d'évènement référence pour les orages violents dans le cadre de ce travail.

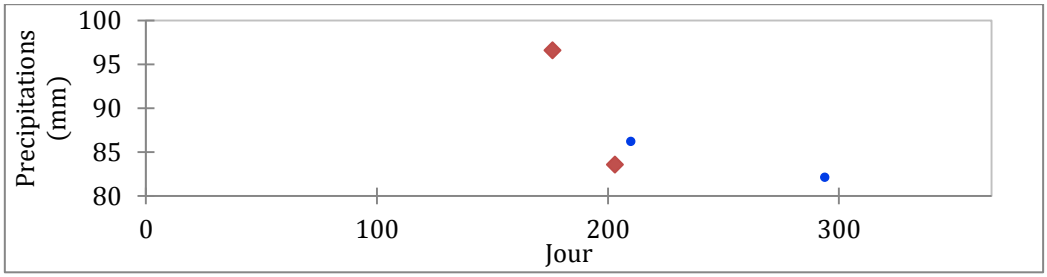


Figure C.1 - Nuage de point de la typologie "évènements extrêmes". Représentation des évènements retenus en rouge.

Évènement du 25/06/2006 : 96,6 mm en 17 heures.

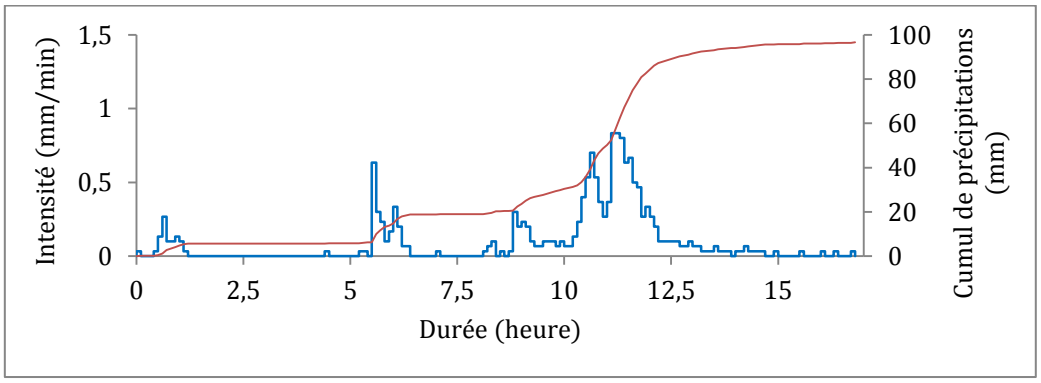


Figure C.2 - Évènement pluviométrique du 25/06/2006 : intensité et cumul de précipitations.

Évènement du 22/07/2013 : 83,6 mm en 3 heures.

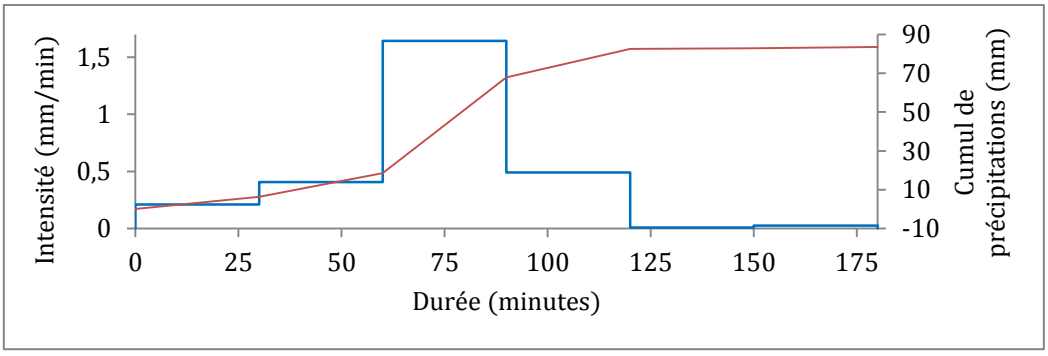


Figure C.3 - Évènement pluviométrique du 22/07/2013 : intensité et cumul de précipitations.

LES ÉVÈNEMENTS MAJEURS

Définition : évènements avec un cumul de précipitations compris entre 45 et 60 mm.
Occurrence : période de retour d'environ 7 ans.
Saisonnalité : été et autonome.

Statistique	Précipitation
	mm
Maximum	61,4
1er Quartile	48,4
Médiane	50,3
3ème Quartile	55,6
Moyenne	52,1

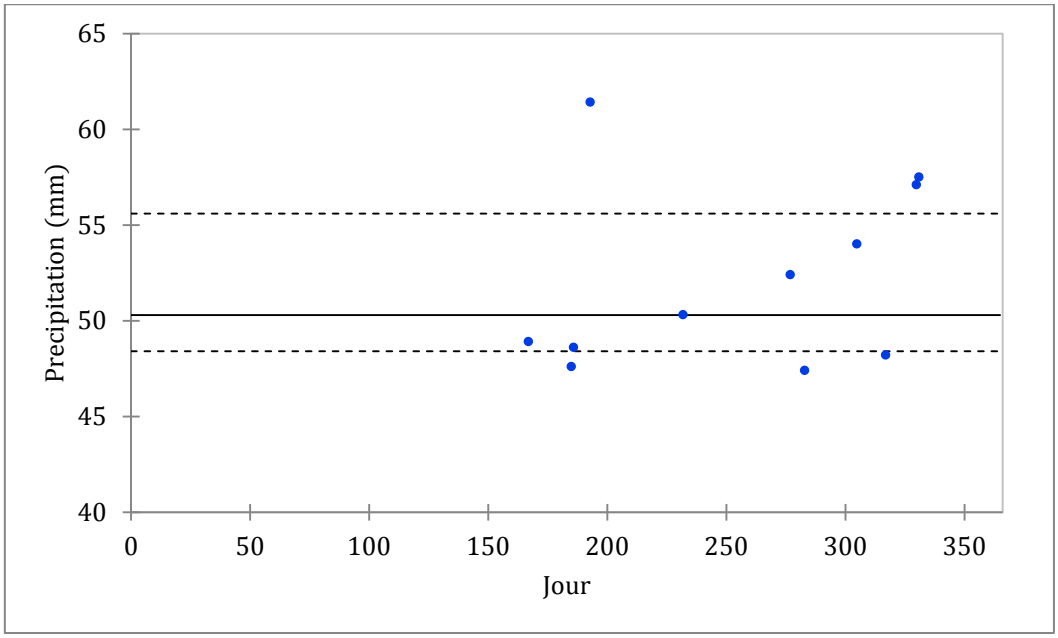


Figure C.4 - Nuage de points de la typologie "évènements majeurs". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu

Évènement du 13/11/2010 : 48,2 mm en 26 heures (de 3h18 le 13/11 à 5h le 14/11).
Conditions initiales : 36 mm précipités de façon diffuse dans les 7 jours précédents.

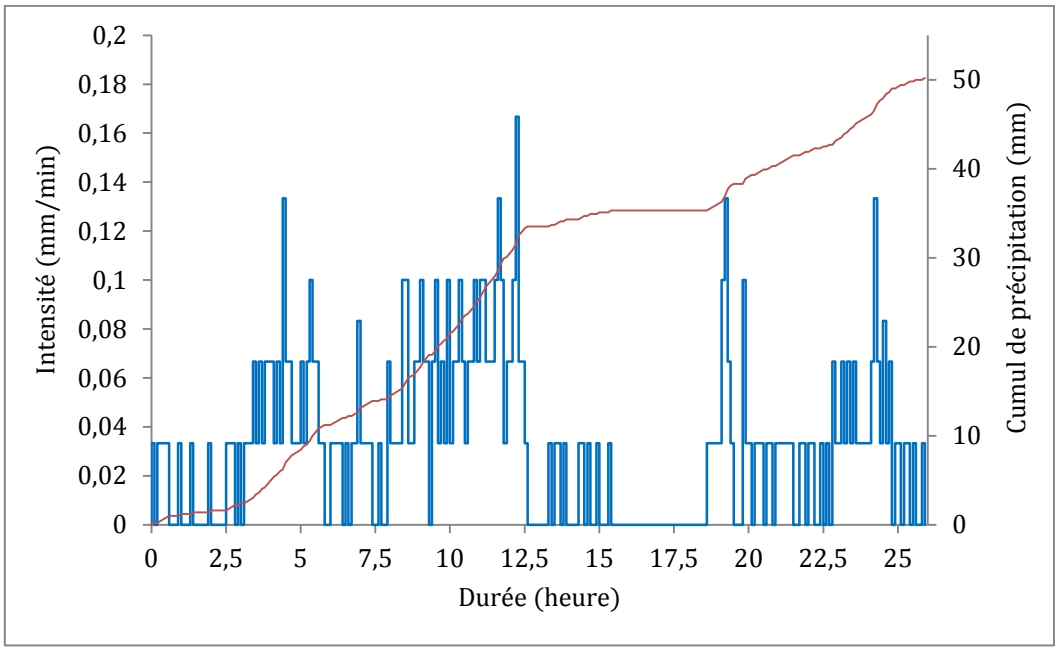


Figure C.5 - Évènement pluviométrique du 13/11/2010 : intensité et cumul de précipitations.

LES ÉVÈNEMENTS SÉVÈRES

Définition : évènements avec un cumul de précipitations compris entre 25 et 45 mm.
Occurrence : de 1 à 2 évènements par an.
Saisonnalité : des évènements toute l'année avec saisonnalité affirmée (probabilité plus forte de mai à octobre).

Statistique	Précipitation
	mm
Maximum	44,9
1er Quartile	27,1
Médiane	29,1
3ème Quartile	34,2
Moyenne	31,2

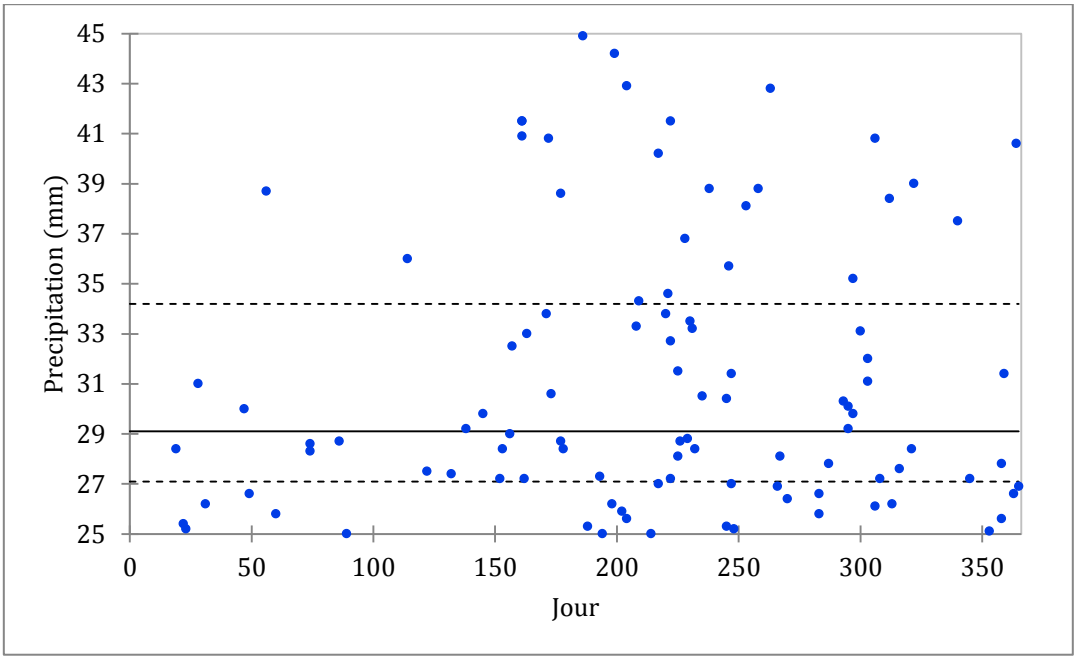


Figure C.6 - Nuage de points de la typologie "évènements sévères". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu

Évènement du 13/08/2011 : 31,3 mm en 11 heures.
Conditions initiales : pas de précipitations dans les 42 heures précédentes.

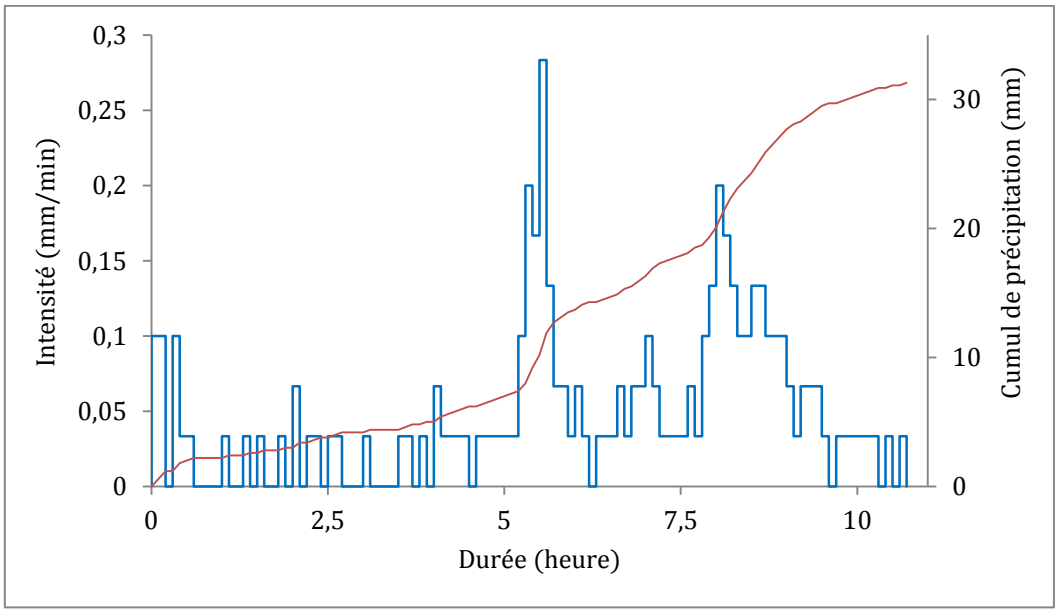


Figure C.7 – Évènement pluviométrique du 13/08/2011 : intensité et cumul de précipitations.

LES ÉVÈNEMENTS INFÉRIEURS À 25 MM

Cette catégorie regroupe les typologies d'évènements dits « occasionnels », « courants », et « faibles ».

LES ÉVÈNEMENTS OCCASIONNELS

Définition : évènements avec une intensité comprise entre 0,05 et 0,09 mm/min et un cumul de précipitations compris entre 2 et 25 mm.
Occurrence : environ 15 évènements par an ; saisonnalité diffuse (un peu moins fréquent de janvier à avril)

Statistique	Précipitation	Durée	Intensité
	mm	*min*	*mm/min*
Maximum	25,8	414	8,89·10-2
1er Quartile	3,2	48	5,54·10-2
Médiane	4,8	72	6,19·10-2
3ème Quartile	8,1	132	7,22·10-2
Moyenne	6,6	103	6,43·10-2

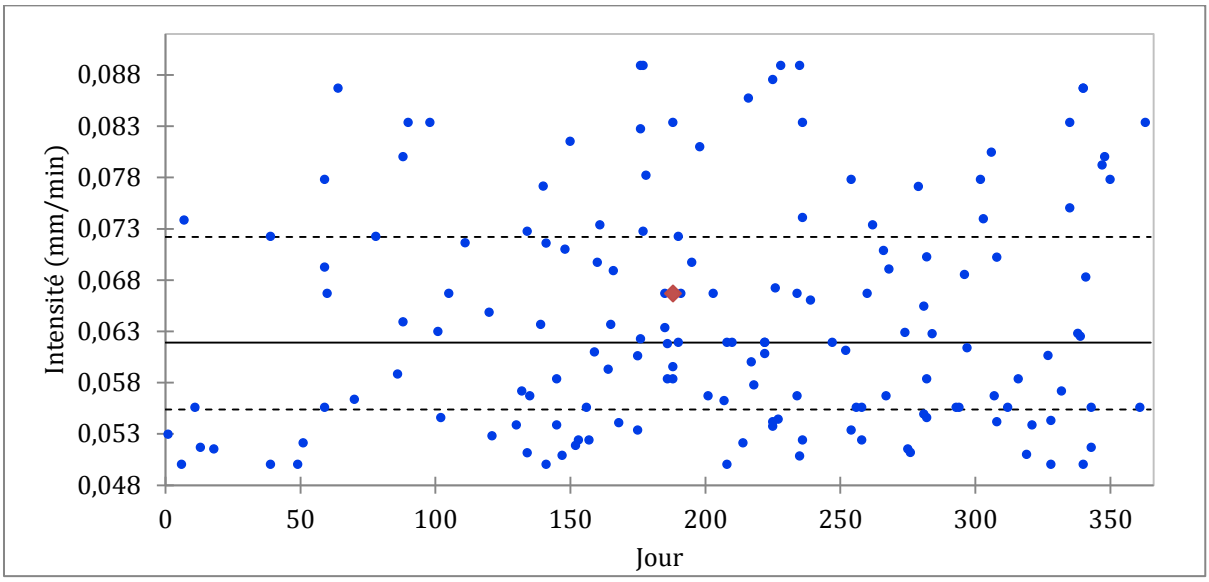


Figure C.8 - Nuage de points de la typologie "évènements occasionnels". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu

Évènement du 06/07/2008 : 5,2 mm tombés en 78 mn de 18h54 à 20h06.
Conditions initiales : 5 mm de pluie tombés dans les 6 heures précédentes.

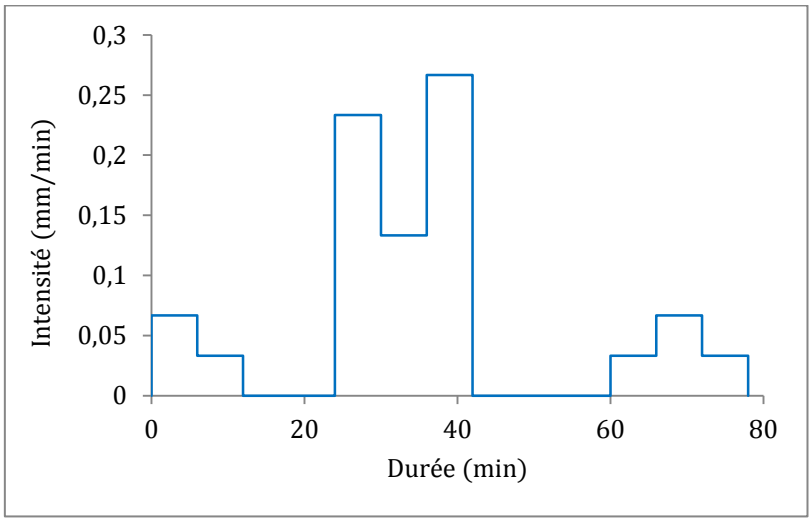


Figure C.9 - Évènement pluviométrique du 06/07/2008

LES ÉVÈNEMENTS COURANTS

Définition : évènements avec une intensité comprise entre 0,033 et 0,05 mm/min et un cumul de précipitations compris entre 2 et 25 mm.
Occurrence : environ 20 évènements par an ; pas de saisonnalité affirmée

Statistique	Précipitation	Durée	Intensité
	mm	*min*	*mm/min*
Maximum	25,6	582	4,95·10-2
1er Quartile	2,6	72	3,51·10-2
Médiane	4,0	108	3,85·10-2
3ème Quartile	6,7	168	4,33·10-2
Moyenne	5,7	144	3,94·10-2

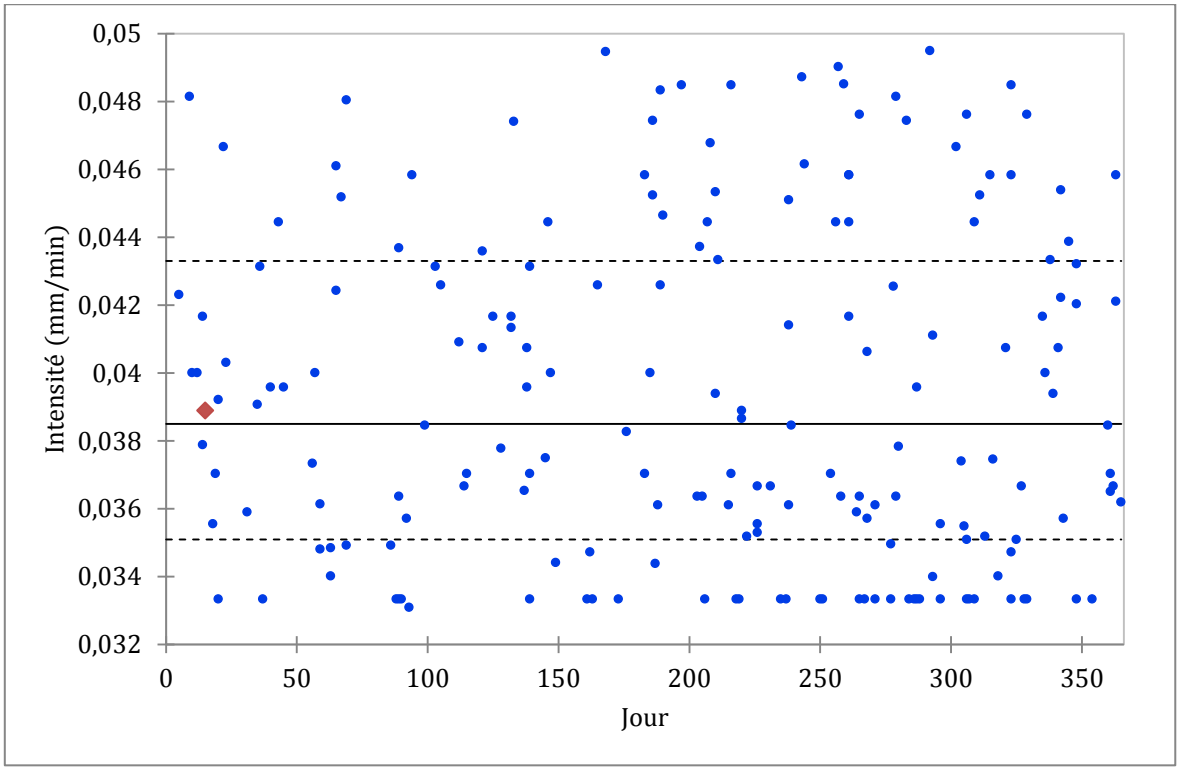


Figure C.10 - Nuage de points de la typologie "évènements courants". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu

Évènement du 15/01/2008 : 5,6 mm tombés en 144 minutes de 13h à 15h24.
Conditions initiales : 6,4 mm de pluie tombés dans les 24 heures précédentes.

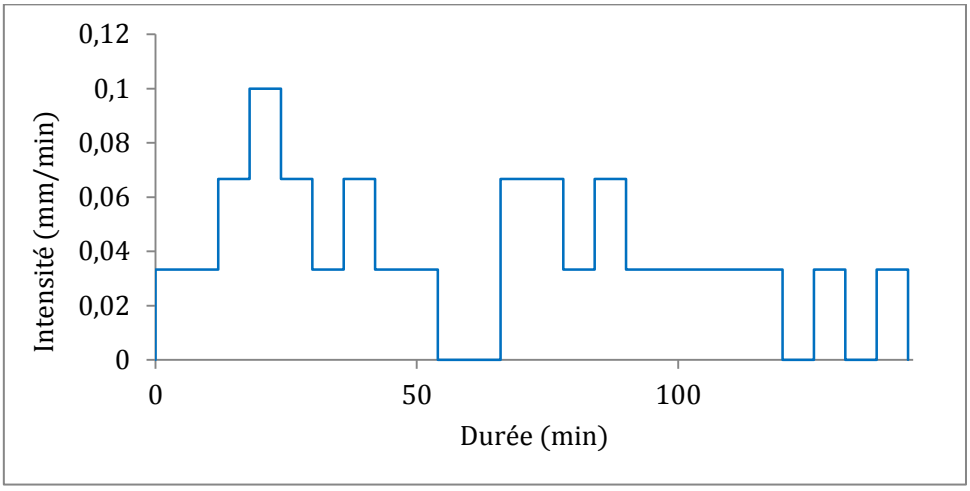


Figure C.11 - Évènement pluviométrique du 15/01/2008

LES ÉVÈNEMENTS FAIBLES

Définition : évènements avec une intensité comprise entre 0,022 et 0,033 mm/min et un cumul de précipitation compris entre 2 et 25 mm.
Occurrence : environ 25 évènements par an ; pas de saisonnalité affirmée

Statistique	Précipitation	Durée	Intensité
	mm	*min*	*mm/min*
Maximum	21,5	828	3,25·10-2
1er Quartile	2,6	102	2,42·10-2
Médiane	4,2	156	2,62·10-2
3ème Quartile	6,8	252	2,94·10-2
Moyenne	5,3	198	2,67·10-2

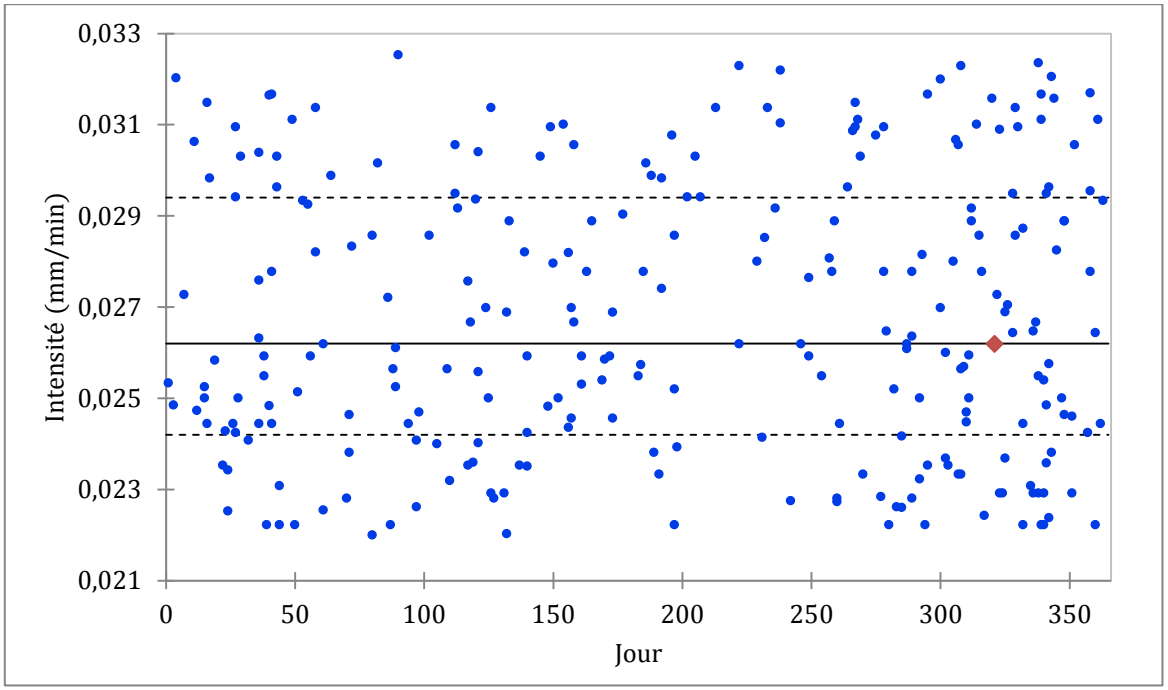


Figure C.12 - Nuage de points de la typologie "évènements faibles". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de l'évènement retenu

Évènement du 17/11/2014 : 4,4 mm tombés en 168 minutes de 22h42 (le 16/11) à 01h24.
Conditions initiales : 0 mm de pluie tombé dans les 2 jours précédents.

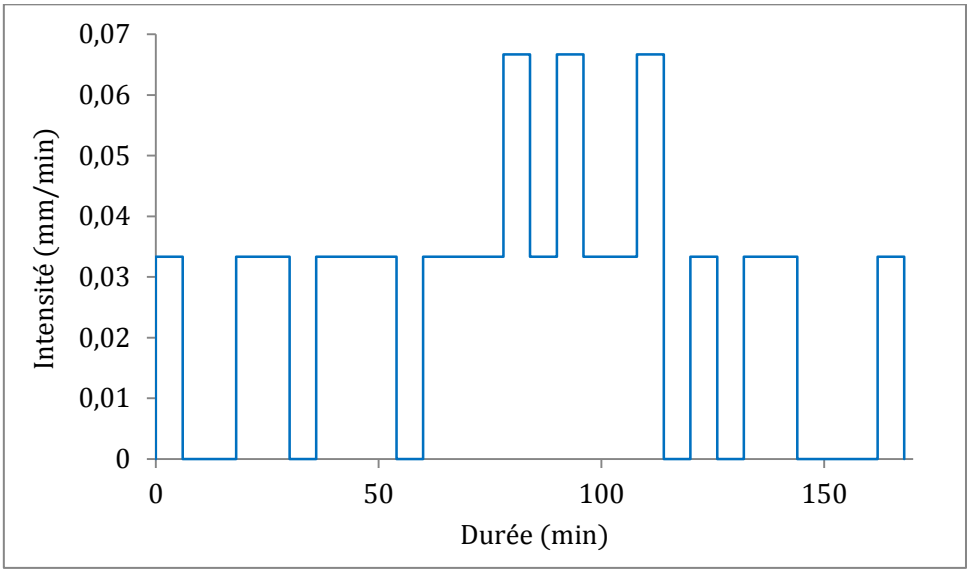


Figure C.13 – Évènement pluviométrique du 17/11/2014

LES SÉRIES D'ÉVÈNEMENTS

Cette catégorie regroupe les typologies de séries d'évènements. Elles sont classées en fonction de leur cumul de précipitations en quatre classes dites : « extrêmes », « majeures », et « occasionnelles » et « courantes ».

LES SÉRIES EXTRÊMES

Définition : séries d'évènements avec un cumul de précipitations supérieur à 110 mm.
Occurrence : période de retour de 20 ans environ.
Saisonnalité : été et début d'hiver (mais difficile à affirmer vu le faible nombre de cas)

Note : les valeurs utilisées ici sont les données journalières de 1945 à 2017. En effet les données au pas de temps 6 minutes ne couvrent pas une période assez longue pour être représentative de cette typologie.

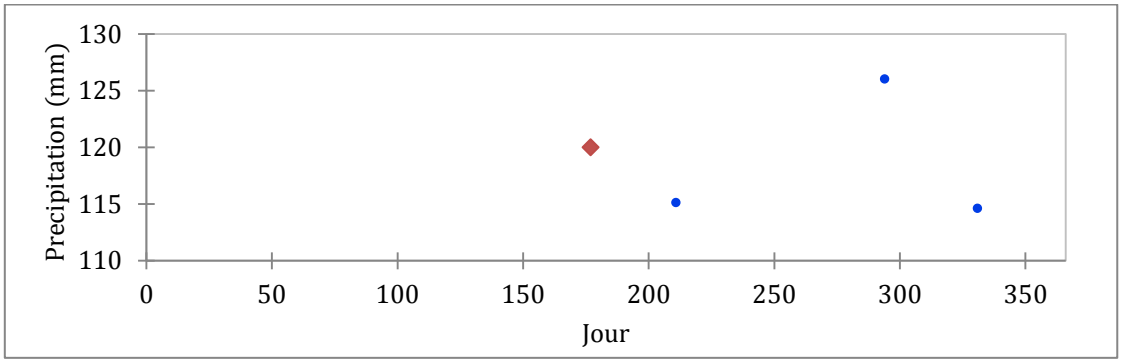


Figure C.14 - Nuage de points de la typologie "séries extrême". Représentation de la série retenue en rouge.

La série du 24/06/2006 au 26/06/2006 : 120 mm en 45 heures.

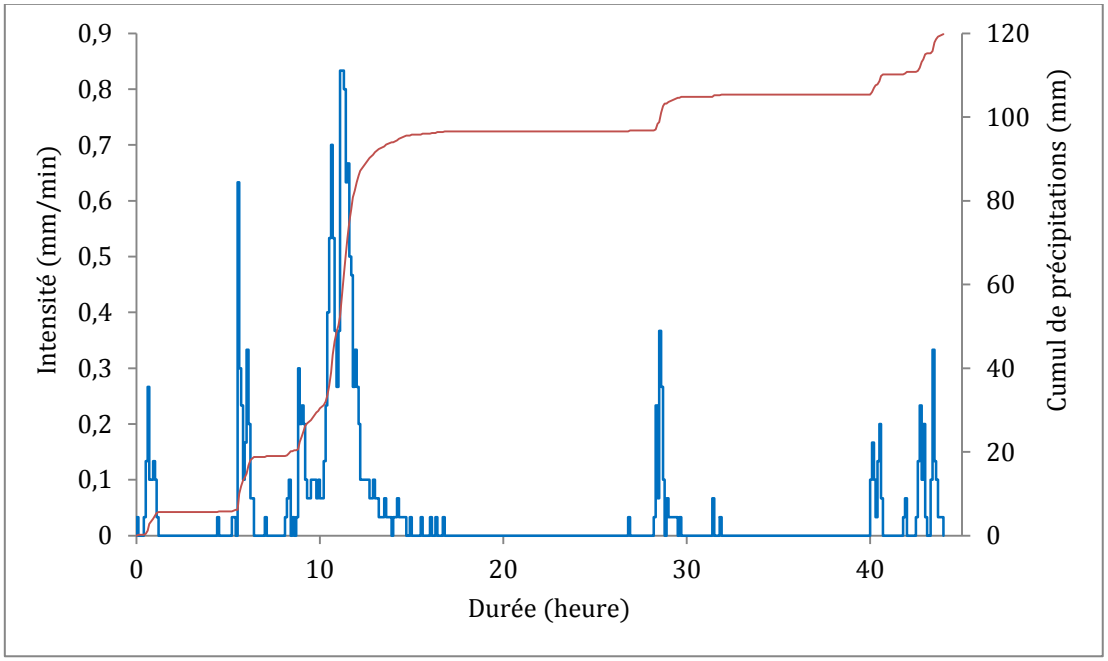


Figure C.15 - Série pluviométrique du 24/06/2006 au 26/06/2006 : intensité et cumul de précipitations.

LES SÉRIES MAJEURES

Définition : séries d'évènements avec un cumul de précipitations compris entre 60 et 95 mm.
Occurrence : environ 1 évènement par an.
Saisonnalité : plutôt en période froide (7 cas) mais possible en période chaude (2 cas)

Statistique	Précipitation	Durée	Intensité
	mm	*min*	*mm/min*
Maximum	95,2	17796	1,75·10-2
1er Quartile	70,2	8958	6,07·10-3
Médiane	75,0	10332	6,65·10-3
3ème Quartile	87,0	13872	7,65·10-3
Moyenne	78,1	11311	7,86·10-3

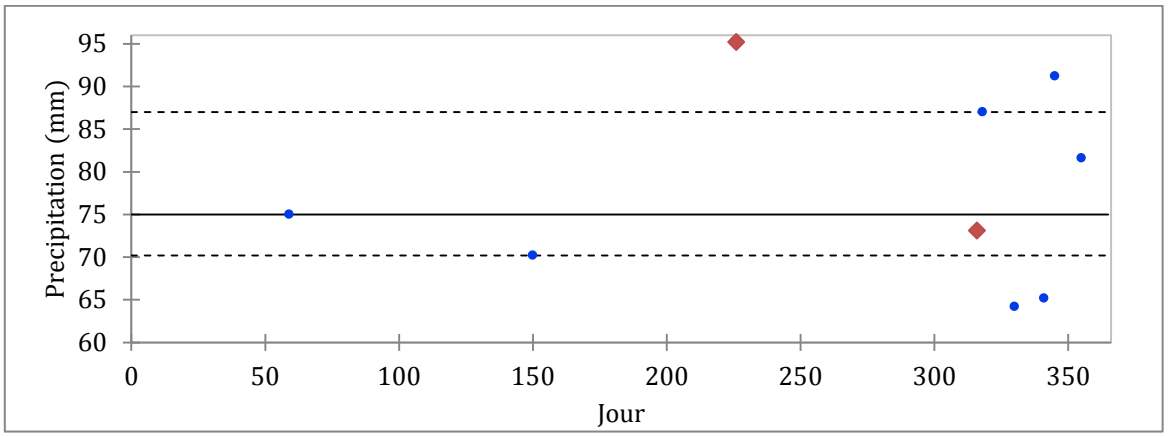


Figure C.16 - Nuage de points de la typologie "séries majeures". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et des séries retenues

La série du 31/10/2013 au 12/11/2013 : 71,1 mm en 296 heures soit environ 12 jours.

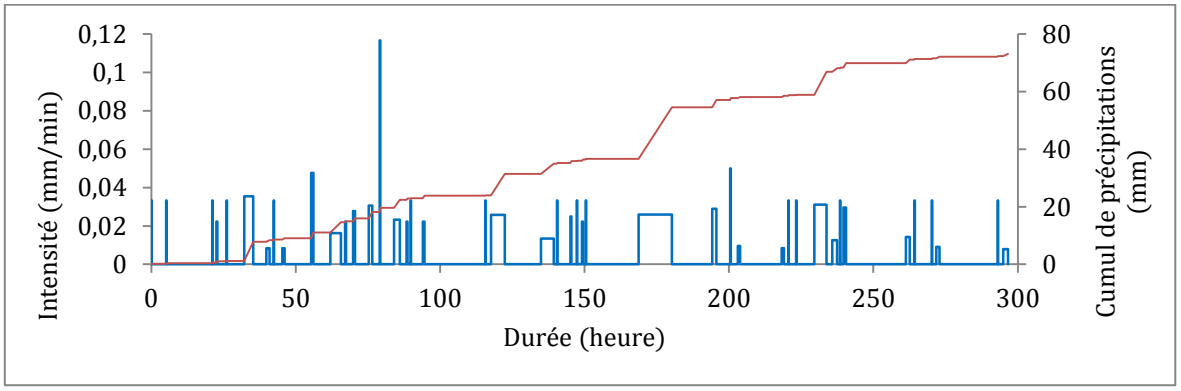


Figure C.17 – Série pluviométrique du 31/10/2013 au 12/11/2013 : intensité et cumul de précipitations.

La série du 11/08/2015 au 14/08/2015 : 95,2 mm en 91 heures soit environ 4 jours.

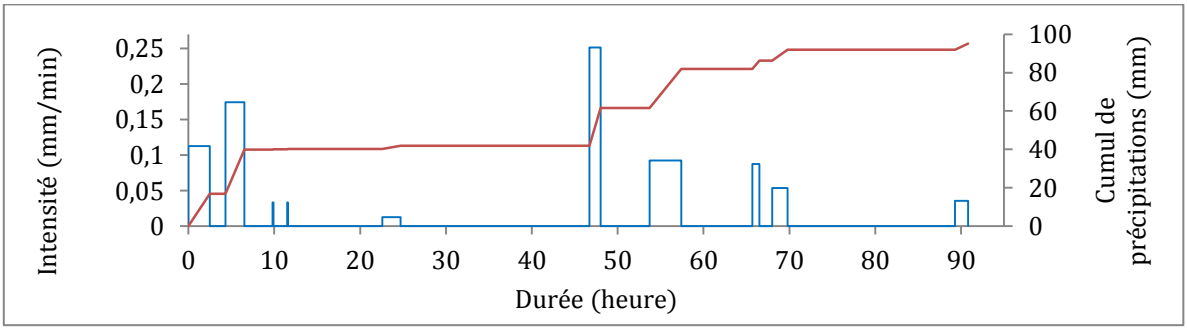


Figure C.18 - Série pluviométrique du 11/08/2015 au 14/08/2015 : intensité et cumul de précipitations.

LES SÉRIES OCCASIONNELLES

Définition : séries d'évènements avec un cumul de précipitations compris entre 25 et 60 mm.
Occurrence : environ 7 évènements par an.
Saisonnalité : non

Statistique	Précipitation *mm*	Durée *min*	Intensité *mm/min*
Maximum	57,1	14388	5,76·10-2
1er Quartile	28,4	3768	4,33·10-3
Médiane	32,9	5802	6,27·10-3
3ème Quartile	41,2	7706	9,36·10-3
Moyenne	35,8	6060	8,64·10-3

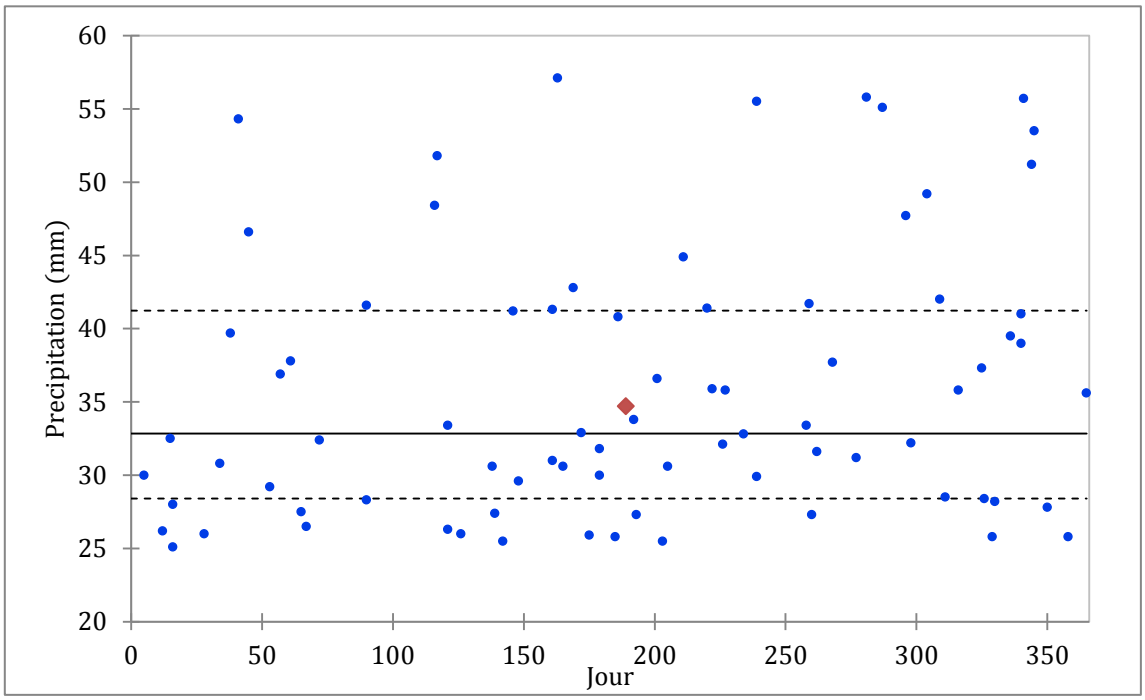


Figure C.19 - Nuage de points de la typologie "séries occasionnelles". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de la série retenue

La série du 04/07/2014 au 08/07/2014 : 34,7 mm en 95 heures soit environ 4 jours.

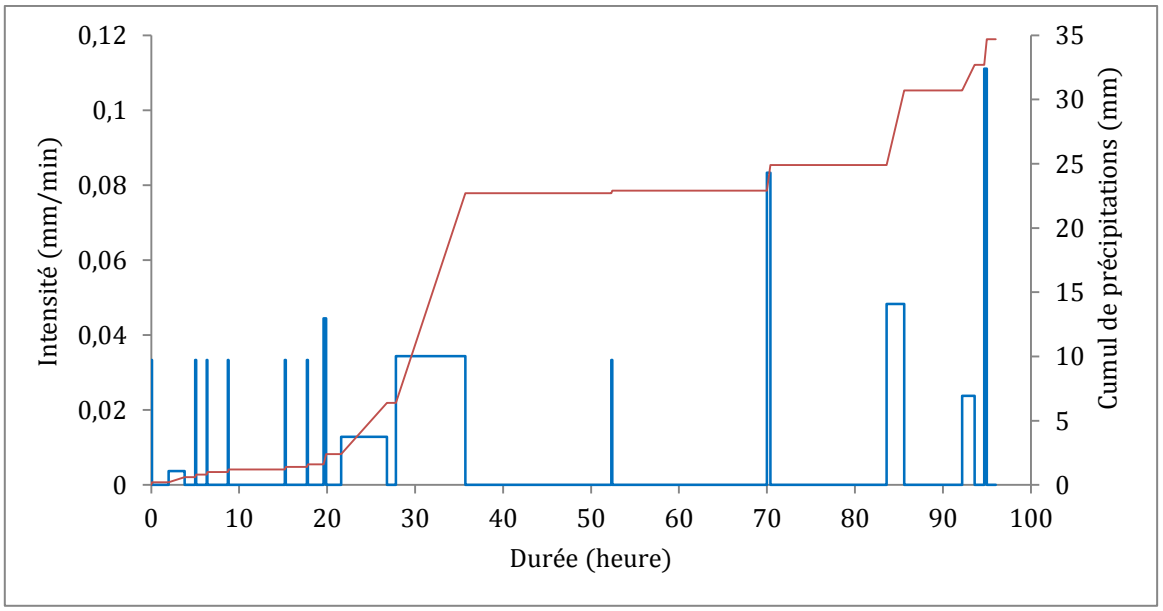


Figure C.20 - Série pluviométrique du 04/07/2014 au 08/07/2014 : intensité et cumul de précipitations.

Définition : séries d'évènements avec un cumul de précipitations compris entre 5 et 25 mm.
Occurrence : environ 32 évènements par an.
Saisonnalité : non

Statistique	Précipitation	Durée	Intensité
	mm	*min*	*mm/min*
Maximum	24,8	10434	7,82·10-2
1er Quartile	6,8	1353	3,11·10-3
Médiane	10,4	2244	4,55·10-3
3ème Quartile	14,9	3603	7,53·10-3
Moyenne	11,5	2612	6,93·10-3

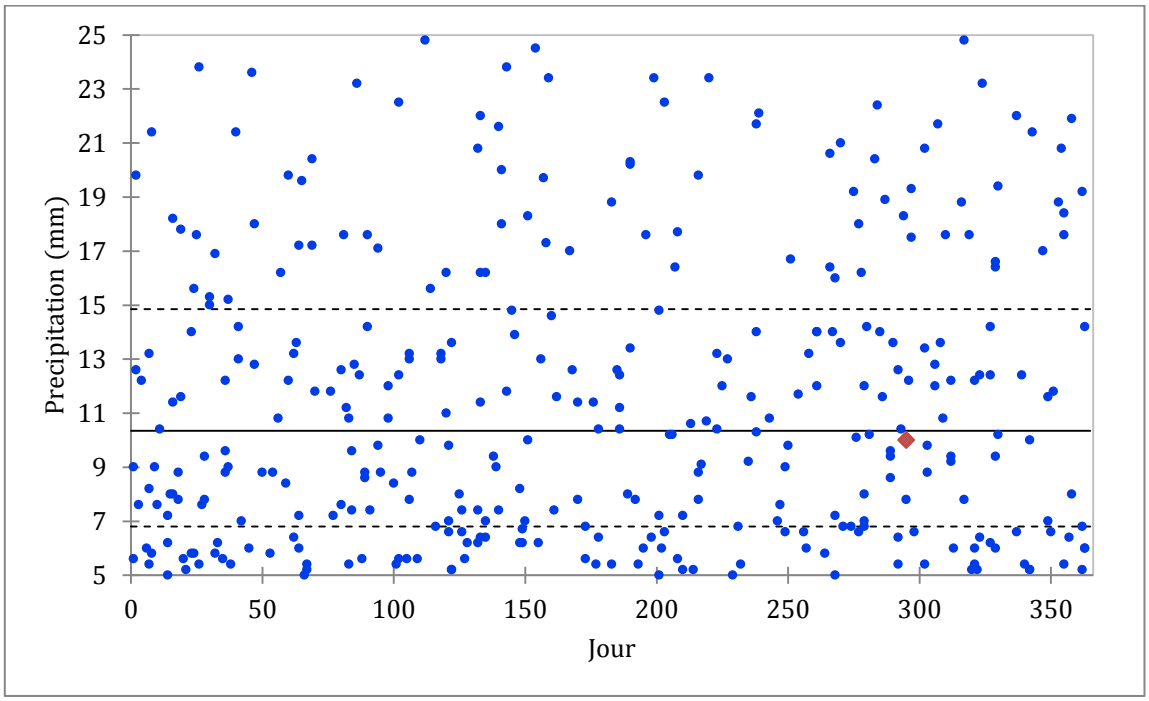


Figure C.21 - Nuage de points de la typologie "séries courantes". Représentation des 1er et 3ème quartiles, de la médiane et de la série retenue

La série du 19/10/2016 au 21/10/2016 : 10 mm en 41 heures.

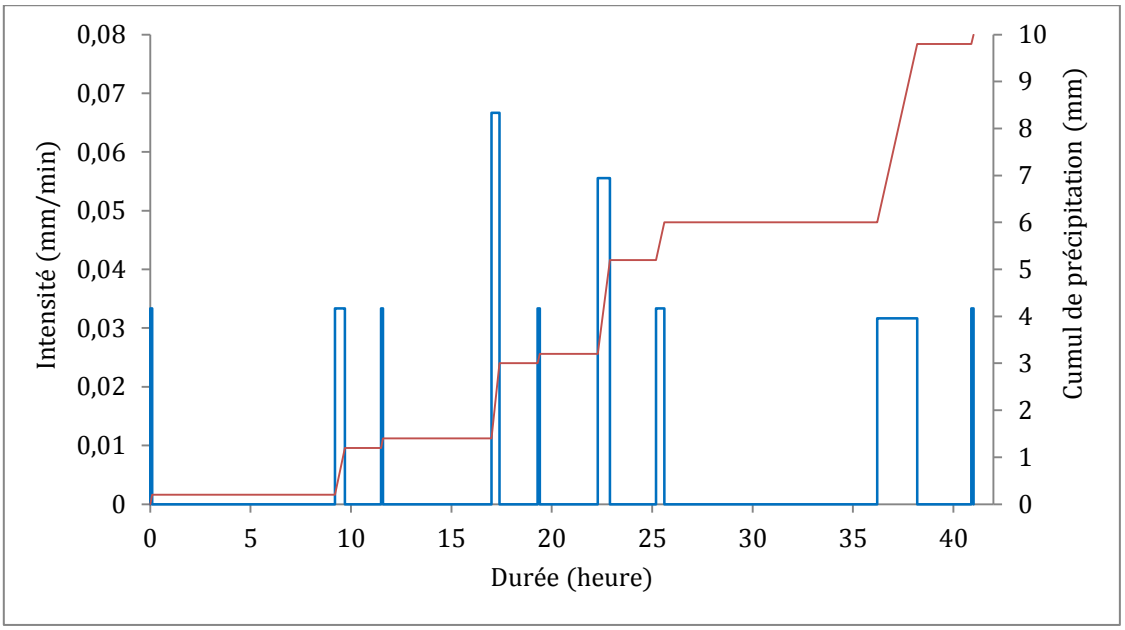


Figure C.22 - Série pluviométrique du 19/10/2016 au 21/10/2016 : intensité et cumul de précipitations.

Annexe D. FICHE CLIMATOLOGIQUE DE LA STATION MÉTÉO FRANCE DE CAEN-CARPIQUET

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

FICHE CLIMATOLOGIQUE

Statistiques 1981−2010 et records

CAEN−CARPIQUET (14)

Indicatif : 14137001, alt : 67m, lat : 49°10'48"N, lon : 00°27'18"W

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
La température la plus élevée (°C)													Records établis sur la période du 01−10−1945 au 19−04−2018
	16.1	20.8	24.4	26.6	30.4	34.9	36.6	38.9	33.5	28.9	21.6	17.2	**38.9**
Date	13−1993	28−1960	29−1946	21−2018	25−1953	21−2017	01−1952	05−2003	02−1961	01−2011	01−2015	16−1989	**2003**
Température maximale (moyenne en °C)													
	8	8.6	11.5	13.6	17.1	20.1	22.6	22.8	20.1	16.1	11.5	8.3	**15.1**
Température moyenne (moyenne en °C)													
	5.3	5.5	7.8	9.5	12.8	15.6	17.8	18	15.6	12.4	8.4	5.7	**11.2**
Température minimale (moyenne en °C)													
	2.6	2.4	4.2	5.3	8.5	11	13.1	13.2	11.1	8.7	5.3	3	**7.4**
La température la plus basse (°C)													Records établis sur la période du 01−10−1945 au 19−04−2018
	−19.6	−16.5	−7.4	−5.7	−0.8	1	4.7	4	1.8	−3.7	−6.8	−11	**−19.6**
Date	08−1985	03−1956	03−1965	11−1978	14−2010	02−1962	07−1962	28−1974	22−1948	30−1997	26−1989	26−1948	**1985**
Nombre moyen de jours avec													
Tx >= 30°C	.	.	.	.	0.0	0.6	1.2	1.3	0.3	.	.	.	**3.5**
Tx >= 25°C	.	.	.	0.1	1.3	3.4	7.4	7.1	2.9	0.4	.	.	**22.6**
Tx <= 0°C	1.3	0.5	.	.	.	.	.	.	.	.	0.1	0.3	**2.2**
Tn <= 0°C	7.9	7.9	3.9	1.2	0.0	.	.	.	.	0.5	3.2	7.5	**32.1**
Tn <= -5°C	1.9	1.1	0.1	.	.	.	.	.	.	.	0.3	1.0	**4.4**
Tn <= -10°C	0.3	0.1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	**0.4**
	Tn : Température minimale, Tx : Température maximale												
La hauteur quotidienne maximale de précipitations (mm)													Records établis sur la période du 01−10−1944 au 19−04−2018
	31	38.7	28.7	36	29.8	93	86.2	50.3	42.8	82.1	57.5	40.6	**93**
Date	28−1958	25−1950	27−1986	24−2014	25−2009	25−2006	29−1978	20−1975	20−1973	21−1955	27−1961	30−1978	**2006**
Hauteur de précipitations (moyenne en mm)													
	66.1	52.4	55.6	50.4	62.6	57.9	52.6	51.2	60.8	77.6	74.6	78.1	**739.9**
Nombre moyen de jours avec													
Rr >= 1 mm	12.0	10.7	10.8	10.3	10.2	8.2	8.0	7.6	9.5	12.1	12.7	13.6	**125.7**
Rr >= 5 mm	4.9	3.7	3.7	3.8	4.4	3.7	3.0	2.9	4.2	5.3	4.9	5.5	**50.1**
Rr >= 10 mm	1.6	1.1	1.4	1.1	2.1	1.7	1.2	1.3	1.9	2.3	2.1	2.0	**19.7**
	Rr : Hauteur quotidienne de précipitations												

Page 1/2

Edité le : 28/04/2018 dans l'état de la base

N.B.: La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues en l'état ou sous forme de produits dérivés est strictement interdite sans l'accord de METEO−FRANCE

METEO−FRANCE − Direction de la Production
42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse Cedex
https://donneespubliques.meteofrance.fr

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

FICHE CLIMATOLOGIQUE

Statistiques 1981−2010 et records

CAEN−CARPIQUET (14)

Indicatif : 14137001, alt : 67m, lat : 49°10'48"N, lon : 00°27'18"W

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Degrés Jours Unifiés (moyenne en °C)													
	393.7	352.3	314.7	255.6	163.1	83.2	32.3	29.6	79.9	174.6	288.4	382	**2549.4**
Rayonnement global (moyenne en J/cm²)													
	10445	16699	30266	44033	54844	58817	59173	50272	36087	21966	12278	8368	**403248.0**
Durée d'insolation (moyenne en heures)													
	69.6	84.3	125.6	167.3	193.7	213.5	207.1	204.4	167.2	117.8	79.4	61.4	**1691.2**
Nombre moyen de jours avec fraction d'insolation													
= 0 %	8.5	6.0	4.8	2.4	3.0	1.9	1.5	1.2	2.1	4.0	6.6	11.0	**52.7**
<= 20 %	17.4	14.4	13.6	9.0	10.0	8.2	8.9	7.7	8.2	13.0	14.4	18.2	**142.8**
>= 80 %	2.3	2.8	3.6	4.0	4.3	5.2	4.9	5.6	5.2	3.2	1.8	1.8	**44.3**
Evapotranspiration potentielle (ETP Penman moyenne en mm)													
	16.3	25.0	50.7	76.5	106.0	121.0	128.6	110.3	71.4	38.7	18.0	13.9	**776.4**
La rafale maximale de vent (m/s) — Records établis sur la période du 01−01−1981 au 19−04−2018													
	36.3	36	31.1	30	31	29	28	26	31	39	40	42	**42.0**
Date	12−2017	26−1990	10−2008	05−1983	28−2000	02−1981	01−1990	18−1999	15−1983	16−1987	26−1983	26−1999	**1999**
Vitesse du vent moyenné sur 10 mn (moyenne en m/s)													
	5.6	5.2	5.1	4.6	4.2	3.9	4	4	4.1	4.6	4.8	5.1	**4.6**
Nombre moyen de jours avec rafales													
>= 16 m/s	10.2	7.8	8.0	6.0	4.4	2.8	3.0	3.0	4.1	6.6	6.9	8.1	**70.9**
>= 28 m/s	0.7	0.7	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	.	0.0	0.2	0.2	0.4	**2.6**
16 m/s = 58 km/h, 28 m/s = 100 km/h													
Nombre moyen de jours avec													
Brouillard	3.5	3.9	3.5	3.7	3.9	3.1	3.3	4.0	3.4	3.6	3.8	4.7	**44.4**
Orage	0.4	0.2	0.4	1.1	2.6	2.0	2.6	2.1	1.1	0.9	0.4	0.6	**14.3**
Grêle	0.4	0.2	0.3	0.5	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	**2.8**
Neige	3.0	3.9	1.4	0.7	.	.	.	.	.	0.1	0.9	2.6	**12.6**

− : donnée manquante . : donnée égale à 0

Ces statistiques sont établies sur la période 1981−2010 sauf pour les paramètres suivants : insolation (1991−2010), ETP (2001−2010).

Edité le : 28/04/2018 dans l'état de la base

N.B.: La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues en l'état ou sous forme de produits dérivés est strictement interdite sans l'accord de METEO−FRANCE

METEO−FRANCE − Direction de la Production
42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse Cedex
https://donneespubliques.meteofrance.fr

Annexe E. CODE DU MODÈLE *PERMETABLE*

TITLE 'Scenario_01'

{A descriptive label for the output}

SELECT

{Part where user controls over the default behavior of FlexPDE}

SMOOTHINIT {Implements a mild initial-value smoothing for time dependent problems, to help ameliorate discontinuous initial conditions}

PREFER_STABILITY {This selector chooses parameters for nonlinear time-dependent problems that result in greatest solution stability in ill-behaved problems. Equivalent to NEWTON=5, REMATRIX=On}

PENWIDTH = 1 {Sets the on-screen pen width for all plots. Value is an integer (0,1,2,3,...) which specifies the width of the drawn lines, in thousandths of the pixel width (0 means thin).}

PRINTMERGE = On {Send all stages or plot times of each EXPORT statement to a single file. By default, EXPORTS create a separate file for each time or stage. Individual EXPORTS can be controlled by the plot modifier MERGE.}

COORDINATES

{Coordinate system, Cartesian 1D,2D,3D, cylindrical 2D, 3D, etc.}

CARTESIAN2

VARIABLES

{Part where the dependent variable used in the partial differential equation are named}

! Water pressure

h_w ! [m] Water pressure expressed in water column height

DEFINITIONS

{Part where all the parameters, relationships or functions are describe}

! **********
! GLOBAL PARAMETERS
! **********

! Permeability

K_w ! [m/s] Permeability
K_s ! [m/s] Saturated Permeability
K_min ! [m/s] Minimum Permeability

! Water content

o_w ! [-]Water content
o_s ! [-]Saturated water content
o_r ! [-] Minimum water content

! Van Genutchen parameters

a n m

! Gravity constant

g = 9.81 ! [m/s2]

! **
! OUTPUT SETUP
! **
! CROSS SECTION

CS1_x = 0.25 ! [m]
CS2_x = 1.00 ! [m]
CS3_x = 1.75 ! [m]

! **
! PARAMETERS SETUP
! **
!_____

! GEOMETRY

! STRUCTURE

Structure_Width =2.00 ! [m]
Structure_Length =1.00 ! [m]
Structure_Slope =0.00 ! [m/m]
Surface_thick =0.08 ! [m]
Bedding_thick =0.04 ! [m]
Foundation_thick =0.50 ! [m]
Drain_radius =0.05 ! [m]
Drain_height =0.25 ! [m]
Drain_x =1.00! [m]

! CATCHMENT

Runoff_surf =0.50 ! [m]
Catchment_left =5.00 ! [m]
Catchment_right =5.00 ! [m]

! SOIL

Soil_thick =1.38! [m]

!_____

! MATERIALS PROPERTIES

! SURFACE

Surface_K_s = 1.0000000E-03 ! [m/s]
Surface_K_min = 1.0000000E-08 ! [m/s]
Surface_o_s = 2.3000000E-01
Surface_o_r = 1.0000000E-02
Surface_a = 2.9924308E+01
Surface_n= 4.6900000E+00
Surface_m = 7.8678038E-01

! BEDDING

Bedding_K_s = 1.0000000E-03 ! [m/s]
Bedding_K_min = 1.0000000E-08 ! [m/s]
Bedding_o_s = 4.7450000E-01
Bedding_o_r = 4.5000000E-03
Bedding_a = 5.3780000E+01
Bedding_n= 4.5100000E+00
Bedding_m = 7.7827051E-01

! FONDATION

Foundation_K_s = 5.0000000E-02 ! [m/s]
Foundation_K_min = 1.3500000E-05 ! [m/s]
Foundation_o_s = 3.9700000E-01
Foundation_o_r = 4.0000000E-03
Foundation_a = 1.0663000E+02
Foundation_n= 4.5476514E+00
Foundation_m = 7.8010628E-01

! SOIL

Soil_K_s = 5.0000000E-06 ! [m/s]
Soil_K_min = 5.0000000E-09 ! [m/s]
Soil_o_s = 4.3000000E-01
Soil_o_r =1.0000000E-01
Soil_a = 3.6000000E+00
Soil_n= 1.5600000E+00
Soil_m = 3.5897436E-01

!_____

! HYDROLOGICAL IMPUT

! EVAPORATION

PET = 2.31E-08 ! [m/s] 2 mm/days (average value at Caen since 1991)
h_r =2 ! [m] Stop the evaporation if h_w if lower than - h_r

! RUNOFF

Runoff_c_left =0.8
Runoff_c_right =0.8

! DRAIN OUTFLOW

Drain_h_min = 0 ! [m] Drain parameter: minimum pressure
Drain_c =0.6! [-] Drain parameter: orifice coefficient
Drain_ratio =0.067 ! [m^2/m^2] Drain parameter: m^2 of void/m^2 of drain
Drain_Q_max = 2.5 ! [L/s] Maximum outflow
Q_drain_max =
Drain_Q_max/1000*1/(2*PI*Drain_radius*Structure_Length)!*(S_p+S_imp)/10000
! Remove or not the "!" to calculate the flow limitation per "ha" or not

! RAIN

```
Rain_real =
IF t < 3600-360 THEN 000E+00 ELSE
IF t>=3600-360 AND t<5400-360 THEN SWAGE (t-3600, 000E+00,004E-06, 90) ELSE
IF t>=5400-360 AND t<7200-360 THEN SWAGE (t-5400, 004E-06,007E-06, 90) ELSE
IF t>=7200-360 AND t<9000-360 THEN SWAGE (t-7200, 007E-06,027E-06, 90) ELSE
IF t>=9000-360 AND t<10800-360 THEN SWAGE (t-9000, 027E-06,008E-06, 90) ELSE
IF t>=10800-360 AND t<12600-360 THEN SWAGE (t-10800, 008E-06,139E-09, 90) ELSE
IF t>=12600-360 AND t<14400-360 THEN SWAGE (t-12600, 139E-09,422E-09, 90) ELSE
IF t>=14400-360 AND t<16200-360 THEN SWAGE (t-14400, 422E-09,000E+00, 90) ELSE
000E+00

Rain_effective = Rain_real

! ********************************************************************************************
! MODELING SETUP
! ********************************************************************************************

Time_Start = 0 ! [s]

Time_Start_Rain = 3600 ! [s]
Time_End_Rain = 14400 ! [s]
Time_End =57600 ! [s]
Time_Step =60 ! [s]
Time_Step_Rain = 0.4 ! [s]
Swage_Step =360 ! [s]

! ********************************************************************************************

! INITIAL VALUES

! ********************************************************************************************

! WATER TABLE

Water_table = Surface_thick+Bedding_thick+Foundation_thick+Soil_thick ! [m]

! WATER STORAGE

Storage_Surface_i = 1.60E-03 ! [m3]
Storage_Bedding_i =3.60E-04 ! [m3]
Storage_Foundation_i =3.97E-03 ! [m3]
Storage_Soil_i = 0.829781 ![m3]
Storage_structure_i = Storage_Surface_i + Storage_Bedding_i + Storage_Foundation_i

! ********************************************************************************************

! HYDROLOGICAL BEHAVIOR CALCULATION

! ********************************************************************************************

! EVAPORATION CALCULATION

RET = PET*PET_c ! [m/s]

! RUNOFF CATCHMENT

Surf_permeable = Structure_Width*Structure_Length ! [m2]
Surf_left = Catchment_left*Structure_length ! [m2]
```

```
Surf_right = Catchment_right*Structure_length ! [m2]
Surf_imp = Surf_left + Surf_right ! [m2]
Ratio_imp_p = Surf_imp/Structure_slope

! RUNOFF CALCULATION

Runoff_left = Rain_effective*Runoff_c_left*Surf_left/(Structure_length*Runoff_surf)
Runoff_right = Rain_effective*Runoff_c_right*Surf_right/(Structure_length*Runoff_surf)

! DRAIN OUTFLOW CALCULATION

Q_drain = Drain_c*(2*g)^(1/2)*Drain_ratio *h_w^(1/2)

! HYDRAULIC HEAD

h = h_w + y! [m]

! WATER FILTRATION SPEED

V_w_x= -K_w*dx(h) ! [m/s]
V_w_y= -K_w*dy(h) ! [m/s]
V_w = vector(V_w_x,V_w_y) ! [m/s]

! SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE(SWCC) - FROM VAN GENUCHTEN LAW

o_w = IF h_w < 0 THEN o_r + (o_s - o_r)*(1/(1+(a*ABS(h_w))^n))^(m) ELSE o_s

! SLOPE OF THE SWCC : m_w = d(o_w)/d(h)

m_w = IF h_w < 0 THEN ((1-n)*ABS(-a*h_w)^n*(1+ABS(-a*h_w)^n)^((1/n)-2)*(o_s-o_r))/h_w
ELSE 1

! EFFECTIVE WATER SATURATION

o_e = (o_w - o_r )/(o_s - o_r )

! PERMEABILITY - FROM VAN GENUCHTEN LAW

K_w = IF h_w < 0 THEN MAX(K_min ; K_s*SQRT(o_e)*(1 - (1 - o_e^(1/m))^m)^2) ELSE K_s

! ************************************************************************************************

! INDICATORS CALCULATION

! ************************************************************************************************

! RAINFALL

Total_Rain = TINTEGRAL(Rain_real)

! INFLOW

Inflow_direct = IF Rain_real > 0 THEN MIN(2*Rain_real*Structure_Width ; -
LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Surface_h')) ELSE 0
Total_Inflow_direct = TINTEGRAL(Inflow_direct)
Inflow_left = IF Rain_real > 0 THEN MIN(2*Runoff_left*Runoff_surf + 2*Rain_real*Runoff_surf ;
- LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Surface_Left')) ELSE 0
Total_Inflow_left = TINTEGRAL(Inflow_left)
Inflow_right = IF Rain_real > 0 THEN MIN(2*Runoff_left*Runoff_surf + 2*Rain_real*Runoff_surf
; - LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Surface_Right')) ELSE 0
Total_Inflow_right = TINTEGRAL(Inflow_right)
```

```
Inflow_sum = Inflow_direct + Inflow_left+ Inflow_right
Total_Inflow_sum = TINTEGRAL(Inflow_sum)
Inflow_sum_th = Rain_real*Structure_Width + Runoff_left*Runoff_surf + Runoff_right*Runoff_surf
Total_Inflow_sum_th = TINTEGRAL(Inflow_sum_th)

! WATER STORAGE

Storage_Surface = VOL_INTEGRAL(o_w, 'Surface')
Storage_Bedding = VOL_INTEGRAL(o_w, 'Bedding')
Storage_Foundation = VOL_INTEGRAL(o_w, 'Foundation')
Storage_Soil = VOL_INTEGRAL(o_w, 'Soil')
Storage_Structure = Storage_Surface + Storage_Bedding + Storage_Foundation

! EQUIVALENT WATER HIGHT

Water_height_Surface = Storage_Surface/Structure_Width
Water_height_Bedding = Storage_Bedding/Structure_Width
Water_height_Foundation = Storage_Foundation/Structure_Width
Water_height_Soil = Storage_Soil/Structure_Width

! WATER BALANCE

WB_Surface = -Storage_Surface_i + Storage_Surface
WB_Bedding = -Storage_Bedding_i + Storage_Bedding
WB_Foundation = -Storage_Foundation_i + Storage_Foundation
WB_Soil = -Storage_Soil_i + Storage_Soil
WB_Structure = -Storage_Structure_i + Storage_Structure

! EVAPORATION

Evaporation = IF Rain_real = 0 THEN MAX(LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Surface_h');0) + MAX(LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Surface_Left');0) + MAX(LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Surface_Right');0) ELSE 0
Evaporation_th = IF Rain_real = 0 THEN LINE_INTEGRAL(RET, 'Surface_h') ELSE 0
Total_Evaporation = TINTEGRAL(Evaporation)
Total_Evaporation_th = TINTEGRAL(Evaporation_th)

! DRAIN OUTFLOW

Outflow_drain = ABS(LINE_INTEGRAL(NORMAL(V_w), 'Drain', 'Foundation'))
Total_Outflow_drain = TINTEGRAL(Outflow_drain)

! FLOW FROM SURFACE TO BEDDING LAYER

Total_Flow_Surface_Bedding = Total_Inflow_sum - WB_Surface - Total_Evaporation
Flow_Surface_Bedding = dt(Total_Flow_Surface_Bedding)

! FLOW FROM BEDDING TO FUNDATION LAYER

Total_Flow_Bedding_Foundation = Total_Flow_Surface_Bedding - WB_Bedding
Flow_Bedding_Foundation = dt(Total_Flow_Bedding_Foundation)

! INFILTRATION

Total_Infiltration = Total_Flow_Bedding_Foundation - WB_Foundation - Total_Outflow_drain
```

Infiltration = dt(Total_Infiltration)

! WATER FLOW AT THE WATER TABLE HEAD

Total_Water_table_flow = Total_Infiltration - WB_Soil
Water_table_flow = dt(Total_Water_table_flow)

! RESULTS

Inflow_result = Total_Inflow_sum*Structure_Length
Inflow_verif = Total_Inflow_sum_th-Total_Inflow_sum
Outflow_result = Total_Outflow_drain*Structure_Length
Storage_result = WB_Structure*Structure_Length
Evaporation_result = Total_Evaporation*Structure_Length
Infiltration_result = Total_Infiltration*Structure_Length
Storage_pct = Storage_result/Inflow_result
Outflow_pct = Outflow_result /Inflow_result
Evaporation_pct = Evaporation_result/Inflow_result
Infiltration_pct = Infiltration_result/Inflow_result

INITIAL VALUES

{Part where the starting values for nonlinear or time dependent problems are setup}

h_w = -Water_table - y

EQUATIONS

{Part where each dependent variable is associated with a partial differential equation}

DIV(-K_w*GRAD(h_w+y)) + m_w*dt(H) = 0

BOUNDARIES

{Part where the geometry is described by walking the perimeter of the domain, stringing together line or arc segments to bind the figure}

REGION 1 'Box'

K_s = Soil_K_s
K_min = Soil_K_min
o_s = Soil_o_s
o_r = Soil_o_r
a = Soil_a
n = Soil_n
m = Soil_m
START 'box' (0, 0)
NATURAL(h_w) = IF Rain_real = 0 THEN (IF h_w > -h_r THEN RET*(1 + h_w /h_r) ELSE 0) ELSE -Rain_real-Runoff_leftLINE TO (Runoff_surf, -Runoff_surf*Structure_Slope)! Runoff from the left or evaporation
NATURAL(h_w) = IF Rain_real = 0 THEN (IF h_w > -h_r THEN RET*(1 + h_w /h_r) ELSE 0) ELSE -Rain_real LINE TO (Structure_Width-Runoff_surf, -(Structure_Width-Runoff_surf)*Structure_Slope) ! Direct rainfall or evaporation

NATURAL(h_w) = IF Rain_real = 0 THEN (IF h_w > -h_r THEN RET*(1 + h_w /h_r) ELSE 0) ELSE -Rain_real-Runoff_rightLINE TO (Structure_Width, - Structure_Width*Structure_Slope)! Runoff from the right or evaporation
NATURAL(h_w) = 0 LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Soil_thick)! Vertical impermeable layer on the right
VALUE(h_w) = 0 LINE TO (0, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Soil_thick)! Stable water table at the bottom
NATURAL(h_w) = 0 LINE TO CLOSE! Vertical impermeable layer on the left

REGION 3 'Surface'

MESH_DENSITY = 50+400*(Y+X*Structure_Slope) ! Define mesh density on the surface layer
K_s = Surface_K_s
K_min = Surface_K_min
o_s = Surface_o_s
o_r = Surface_o_r
a = Surface_a
n = Surface_n
m = Surface_m
START 'Surface' (0, 0)
LINE TO (Structure_Width, - Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick- Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO (0, -Surface_thick)
LINE TO CLOSE

REGION 4 'Bedding'

MESH_DENSITY = 50! Define mesh density on the bedding layer
K_s = Bedding_K_s
K_min = Bedding_K_min
o_s = Bedding_o_s
o_r = Bedding_o_r
a = Bedding_a
n = Bedding_n
m = Bedding_m
START 'Bedding' (0, -Surface_thick)
LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO(Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO (0, -Surface_thick-Bedding_thick)
LINE TO CLOSE

REGION 6 'Foundation'

K_s = Foundation_K_s
K_min = Foundation_K_min
o_s = Foundation_o_s
o_r = Foundation_o_r
a = Foundation_a
n = Foundation_n
m = Foundation_m

START 'Foundation' (0, -Surface_thick-Bedding_thick)
LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO (0, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick)
LINE TO CLOSE

EXCLUDE 'Drain'! If there is a drain

START 'Drain'(Drain_x-Drain_radius, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_x*Structure_Slope)
NATURAL (h_w) = IF h_w > Drain_h_min THEN IF Q_drain < Q_drain_max THEN Q_drain ELSE Q_drain_max ELSE 0 ! Outflow through the drain is h_w is > Drain_h_min
ARC (CENTER=Drain_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_x*Structure_Slope) ANGLE=360

REGION 8 'Soil'

K_s = Soil_K_s
K_min = Soil_K_min
o_s = Soil_o_s
o_r = Soil_o_r
a = Soil_a
n = Soil_n
m = Soil_m
START 'Soil' (0, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick)
LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Soil_thick)
LINE TO (0, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Soil_thick)
LINE TO CLOSE

FEATURE

START 'Surface_h' (Runoff_surf, -Runoff_surf*Structure_Slope) LINE TO (Structure_Width-Runoff_surf, -(Structure_Width-Runoff_surf)*Structure_Slope)
START 'Surface_Left' (0, 0) LINE TO (Runoff_surf, -Runoff_surf*Structure_Slope)
START 'Surface_right' (Structure_Width-Runoff_surf, -(Structure_Width-Runoff_surf)*Structure_Slope) LINE TO (Structure_Width, -Structure_Width*Structure_Slope)
START 'Surface_b' (0, -Surface_thick) LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
START 'Foundation_b' (0, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick) LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Structure_Width*Structure_Slope)
START 'Soil_b' (0, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Soil_thick) LINE TO (Structure_Width, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-Soil_thick)

TIME

{Part to define beginning time and ending time of the simulation}

Time_Start TO Time_End

MONITORS

{Part to define the desired values to be monitored during the simulation}

FOR T=Time_Start BY Time_Step TO Time_End

HISTORY (Rain_real)

PLOTS

{Part to define the desired graphical outputs. Plot may be any combination of CONTOUR, SURFACE, ELEVATION, or VECTOR plots}

! PLOTED INFORMATION AT THE BEGINNING

FOR T=Time_Start

SUMMARY EXPORT
REPORT "INITIAL WATER STORAGE"
REPORT" "
REPORT"Results to adjust the initial water storage parameters"
REPORT"Udapte the code and run the model again"
REPORT" "
REPORT(Storage_Surface) AS "Water storage inside the surface layer [m3]"
REPORT(Storage_Bedding) AS "Water storage inside the bedding layer [m3]"
REPORT(Storage_Foundation) AS "Water storage inside the foundation layer [m3]"
REPORT(Storage_Structure) AS "Water storage inside the permeable structure [m3]"
REPORT(Storage_Soil) AS "Water Storage in the soil [m3]"
SUMMARY EXPORT
REPORT "PARAMETERS REPORT"
REPORT"Initial parameters"
REPORT(Water_table) AS "Initial water table height [m]"
REPORT" "
REPORT"Time parameters"
REPORT(Time_Start)
REPORT(Time_Start_Rain)
REPORT(Time_End_Rain)
REPORT(Time_End)
REPORT(Time_Step)
REPORT(Time_Step_Rain)
REPORT" "
REPORT"Geometry paramters"
REPORT(Surface_thick)
REPORT(Structure_Width)
REPORT(Structure_Length)
REPORT(Bedding_thick)
REPORT(Foundation_thick)
REPORT(Drain_radius)
REPORT(Drain_height)
REPORT(Drain_x)
REPORT" "
REPORT(Runoff_surf)

```
REPORT(Catchment_left)
REPORT(Catchment_right)
REPORT"      "
REPORT(Soil_thick)
REPORT"      "
REPORT "Material parameters"
REPORT"      "
REPORT"Surface"
REPORT(Surface_K_s)
REPORT(Surface_K_min)
REPORT(Surface_o_s )
REPORT(Surface_o_r )
REPORT(Surface_a )
REPORT"      "
REPORT "Bedding"
REPORT(Bedding_K_s)
REPORT(Bedding_K_min)
REPORT(Bedding_o_s)
REPORT(Bedding_o_r )
REPORT(Bedding_a)
REPORT(Bedding_n)
REPORT(Bedding_m)
REPORT"      "
REPORT "Foundation"
REPORT(Foundation_K_s)
REPORT(Foundation_K_min)
REPORT(Foundation_o_s)
REPORT(Foundation_o_r )
REPORT(Foundation_a)
REPORT(Foundation_n)
REPORT(Foundation_m)
REPORT"      "
REPORT "Soil"
REPORT(Soil_K_s)
REPORT(Soil_K_min)
REPORT(Soil_o_s)
REPORT(Soil_o_r )
REPORT(Soil_a)
REPORT(Soil_n)
REPORT(Soil_m)
REPORT"      "
REPORT"Drain parameters"
REPORT(Drain_h_min) AS "Minimum pressure: Drain_h_min [m]"
REPORT(Drain_c) AS "Orifice coefficient: Drain_c [-]"
REPORT(Drain_ratio) AS "m² of void/m² of drain: Drain_ratio [m²/m²]"
REPORT(Drain_Q_max) AS "Maximum outflow: Drain_Q_max [L/s]"
REPORT(Q_drain_max) AS "Maximum outflow speed: Q_drain_max [m/s]"
```

```
REPORT"      "
REPORT"Runoff parameters"
REPORT(Runoff_left) AS "Left runoff coefficent [-]"
REPORT(Runoff_right) AS "Right runoff coefficent [-]"
REPORT(Surf_left) AS "Left runoff catchment [m²]"
REPORT(Surf_right) AS "Right runoff catchment [m²]"
REPORT(Surf_imp) AS "Total impermeable catchment [m²]"
REPORT(Surf_permeable) AS "Total permeable Surfacement surface [m²]"
REPORT(Ratio_imp_p) AS "Impermeable catchment/permeable surface [m²/m²]"

! PLOTED INFORMATION AT THE END

FOR T=Time_End
SUMMARY EXPORT
REPORT "Cumulated flow"
REPORT(Total_Rain)
REPORT(Total_Inflow_direct)
REPORT(Total_Inflow_left)
REPORT(Total_Inflow_right)
REPORT(Total_Inflow_sum)
REPORT(Total_Evaporation)
REPORT(Total_Flow_Surface_Bedding)
REPORT(Total_Flow_Bedding_Foundation)
REPORT(Total_Outflow_drain)
REPORT(Total_Infiltration)
REPORT(Total_Water_table_flow)
REPORT"      "
REPORT "Results"
REPORT(Inflow_result)
REPORT(Inflow_verif)
REPORT(Storage_result)
REPORT(Outflow_result)
REPORT(Evaporation_result)
REPORT(Infiltration_result)
REPORT(Storage_pct)
REPORT(Outflow_pct)
REPORT(Evaporation_pct)
REPORT(Infiltration_pct)
REPORT"      "
REPORT "Storage at the end - Water balance"
REPORT(WB_Surface)
REPORT(WB_Bedding)
REPORT(WB_Foundation)
REPORT(WB_Structure)
REPORT(WB_Soil)

TABLE(Inflow_sum, Infiltration, Evaporation, Outflow_drain, Water_table_flow,
Total_Inflow_sum, Total_Infiltration, Total_Evaporation, Total_Outflow_drain,
Total_Water_table_flow)
```

```
TRANSFER(h_w) FILE = "Pression_initiale.dat"

! PLOTED INFORMATION DURING THE RAIN

FOR T = Time_Start_Rain + Time_End_Rain/2

! Values on the full domain

CONTOUR(h_w) painted PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(o_w) painted PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(V_w) paintedREPORT(Total_Inflow_sum)
VECTOR(V_w) norm PNGREPORT(Total_Inflow_sum)

! Values on 3D on the full domain

SURFACE(h_w) PNG
SURFACE(h) PNG
SURFACE(o_w) PNG
SURFACE(-V_w_y)

! Cross section 1

ELEVATION (h_w) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS1_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS1_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS1_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)

! Cross section 2

ELEVATION (h_w) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS2_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS2_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS2_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)

! Cross section 3

ELEVATION (h_w) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS3_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS3_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-
CS3_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)

FOR T = Time_End_Rain

! Values on the full domain

CONTOUR(h_w) painted PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(o_w) painted PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(V_w) painted PNGREPORT(Total_Inflow_sum)
VECTOR(V_w) norm PNGREPORT(Total_Inflow_sum)
```

! Values on 3D on the full domain

SURFACE(h_w) PNG
SURFACE(h) PNG
SURFACE(o_w) PNG
SURFACE(-V_w_y) PNG

! Cross section 1

ELEVATION (h_w) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)

! Cross section 2

ELEVATION (h_w) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)

! Cross section 3

ELEVATION (h_w) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) PNG REPORT(Total_Inflow_sum)

! PLOT OUTPUT AT EACH TIME STEP

FOR T=Time_Start BY Time_Step TO Time_Start_Rain-Swage_Step Time_Start_Rain-Swage_Step-1 BY Time_Step_Rain TO Time_End_Rain+Swage_Step Time_End_Rain+Swage_Step+1 BY Time_Step To Time_End

! Values on the full domain

CONTOUR(h_w) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(o_w) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(V_w) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
VECTOR(V_w) norm REPORT(Total_Inflow_sum)

! Values zoomed on the left runoff

CONTOUR(h_w) ZOOM (-0.01, -Surface_thick-Bedding_thick-Runoff_surf -(Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)*Structure_Slope,
Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf, Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(o_w) ZOOM (-0.01, -Surface_thick-Bedding_thick-Runoff_surf -(Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)*Structure_Slope,

Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf, Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
VECTOR(V_w) ZOOM (-0.01, -Surface_thick-Bedding_thick-Runoff_surf -(Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)*Structure_Slope,
Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf, Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf) painted REPORT(Total_Inflow_sum)

! Values zoomed on the surface

CONTOUR(h_w) ZOOM (Structure_Width/2-(Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)/2, -Surface_thick-Bedding_thick-Runoff_surf-
(Structure_Width/2+Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)*Structure_Slope,
Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf, Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
CONTOUR(o_w) ZOOM (Structure_Width/2-(Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)/2, -Surface_thick-Bedding_thick-Runoff_surf-
(Structure_Width/2+Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)*Structure_Slope,
Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf, Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf) painted REPORT(Total_Inflow_sum)
VECTOR(V_w) ZOOM (Structure_Width/2-(Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)/2, -Surface_thick-Bedding_thick-Runoff_surf-
(Structure_Width/2+Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf)*Structure_Slope,
Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf, Surface_thick+Bedding_thick+Runoff_surf) painted REPORT(Total_Inflow_sum)

! Values zoomed on the drain

CONTOUR(h_w) ZOOM (Drain_x-4*Drain_radius, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-4*Drain_radius-(Structure_Width/2)*Structure_Slope,
8*Drain_radius, 8*Drain_radius) painted REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG
CONTOUR(o_w) ZOOM (Drain_x-4*Drain_radius, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-4*Drain_radius-(Structure_Width/2)*Structure_Slope,
8*Drain_radius, 8*Drain_radius) painted REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG
VECTOR(V_w) ZOOM (Drain_x-4*Drain_radius, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-4*Drain_radius-(Structure_Width/2)*Structure_Slope,
8*Drain_radius, 8*Drain_radius) painted REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

! Values on 3D on the full domain

SURFACE(h_w)
SURFACE(h)
SURFACE(o_w)
SURFACE(-V_w_y)

! Cross section 1

ELEVATION (h_w) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS1_x,0) TO (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum)

! Cross section 2

ELEVATION (h_w) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (h) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum)
ELEVATION (o_w) FROM (CS2_x,0) TO (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum)

! Cross section 3

ELEVATION (h_w) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum) ! PNG
ELEVATION (h) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum) ! PNG
ELEVATION (o_w) FROM (CS3_x,0) TO (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) REPORT(Total_Inflow_sum) ! PNG

HISTORIES

! Histories on the cross section 1

HISTORY(h_w) AT (CS1_x, 0-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS1_x*Structure_Slope)(CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "h_w_on_CS1" REPORT(Total_Inflow_sum)

HISTORY(o_w) AT (CS1_x, 0-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS1_x*Structure_Slope)(CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "o_w_on_CS1" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(K_w) AT (CS1_x, 0-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS1_x*Structure_Slope)(CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "K_w_on_CS1" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(-V_w_y) AT (CS1_x, 0-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS1_x*Structure_Slope)(CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-

CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS1_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS1_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "V_w_on_CS1" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

! Histories on the cross section 2

HISTORY(h_w) AT (CS2_x, 0-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS2_x*Structure_Slope)(CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "h_w_on_CS2" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(o_w) AT (CS2_x, 0-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS2_x*Structure_Slope)(CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "o_w_on_CS2" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(K_w) AT (CS2_x, 0-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS2_x*Structure_Slope)(CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "K_w_on_CS2" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(V_w_y) AT (CS2_x, 0-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS2_x*Structure_Slope)(CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS2_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS2_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "V_w_on_CS2" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

! Histories on the cross section 3

HISTORY(h_w) AT (CS3_x, 0-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS3_x*Structure_Slope)(CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-

CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "h_w_on_CS3" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(o_w) AT (CS3_x, 0-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS3_x*Structure_Slope)(CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "o_w_on_CS3" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(K_w) AT (CS3_x, 0-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS3_x*Structure_Slope)(CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "K_w_on_CS3" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

HISTORY(-V_w_y) AT (CS3_x, 0-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick -Bedding_thick-CS3_x*Structure_Slope)(CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick+Drain_height-Drain_radius-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick/2) (CS3_x, -Surface_thick-Bedding_thick-Foundation_thick-CS3_x*Structure_Slope-Soil_thick) EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "V_w_on_CS3" REPORT(Total_Inflow_sum) !PNG

! Inflow

HISTORY(Inflow_direct, Inflow_left, Inflow_right, Inflow_sum) AS "Detailled inflow" REPORT(Inflow_sum) REPORT(Total_Inflow_sum)

HISTORY(Inflow_sum, Inflow_sum_th) AS "Compared inflow" REPORT(Total_Inflow_sum) REPORT(Total_Inflow_sum_th)

! Outflow

HISTORY(Evaporation) As "Evaporation" REPORT(Evaporation) REPORT(Total_Evaporation)

! Flow overview

HISTORY(Inflow_sum {, Flow_Surface_Bedding, Flow_Bedding_Foundation, Infiltration}, Outflow_drain, Evaporation) As "Flow overview" EXPORT FORMAT "#t#1#2#3" FILE "Flow_overview" REPORT(Inflow_sum) REPORT(Outflow_drain) REPORT(Evaporation)

! Cumulated flow overview

HISTORY(Total_Inflow_sum, Total_Evaporation, Total_Flow_Surface_Bedding, Total_Flow_Bedding_Foundation ,Total_Infiltration, Total_Outflow_drain, Total_Water_table_flow)AS "Cumulated flow overview" EXPORT FORMAT

"#t#1#2#3#4#5#6#7" FILE "Cumulated_Flow_overview" REPORT(Total_Flow_Surface_Bedding) REPORT(Total_Flow_Bedding_Foundation) REPORT(Total_Infiltration)

! Hydrological behavior

HISTORY(Inflow_result, Evaporation_result, Outflow_result, Infiltration_result, Storage_result)AS "Inflow and Outflow" EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4#5" FILE "Flow_results" REPORT(Inflow_result) REPORT(Evaporation_result) REPORT(Outflow_result) REPORT(Infiltration_result) REPORT(Storage_result)

HISTORY(WB_Surface, WB_Bedding, WB_Foundation, WB_Structure) AS "Storage" EXPORT FORMAT "#t#1#2#3#4" FILE "Water_Balance" REPORT(WB_Surface) REPORT(WB_Bedding) REPORT(WB_Foundation) REPORT(WB_Structure)

END

! Auteur : Olivier Cortier (ESITC Caen & LETG Caen)

Annexe F. CODE DU MODEL *POROUSCITY*

```
extensions
[
  nw  ;add extension for graph operation
  gis ;add extension to import/export the "mnt" as a raster file.
]

;create a turtles classe named drops and one named waters
breed [drops drop]
breed [waters water]

patches-own ; define patches attributs
[
  ;; patch attributs from the GIS data
  pmnt
  pzcor ; elevation
  pzbottom ; elevation of the bottom of the structure (for permeable pavement only)
  pland_use ; land use type
  pground ; ground type [privet, edge, tarmac, compacted, grass, sand, permeable_pavement]
  pwell ; localisation of the infiltration wells
  ;; patch attributs for hydrological simulation
  p_infiltration ; define in mm/min the soil permeability
  p_interception ; define in mm the maximum of interception
  p_flow_in ; define in mm/min the surface permeability (for permeable pavement only)
  p_storage ; define in mm the maximum of storage inside the patch (for permeable pavement
only)
  p_well_storage ; define in mm the maximum of storage inside an infiltration well
  ;; patch hydrological behavior results
  evaporation ; total value of evaporation from the patch
  infiltration ; total value of infiltration into the soil
  interception ; total value of interception above the patch
  runoff ; total value of runoff above the patch
  runoff_cat ; "caterory" of runoff
  pp_drain ; total value of drain outflow from the patch
  pp_infiltration ; total value of infiltration into the soil through permeable pavement
  pp_storage ; total value of storage inside the patch
  pp_cat ; "caterory" of infiltration througth the pp
  well_infiltration ; total value of infiltration into the soil through the well
  well_storage ; total value of storage inside the well
]

drops-own ; define drops attributs
[
  drop_size
]
```

```
waters-own ; define drops attributs
[
 water_size
]

globals ; define global variables
[
 z_min
 z_max
 mnt
 land_use
 gullies
 time_end
 ;; hydrological behavior at global scale
 count_rain
 total_rain
 total_runoff
 total_interception
 total_storage
 total_infiltration
 total_pp_infiltration
 total_well_infiltration
 total_drain
 total_evaporation
 total_outflow
 total_well_storage
 total_sand_infiltration
 total_grass_infiltration
 total_compacted_infiltration
 max_runoff
 runoff_cat_0
 runoff_cat_1
 runoff_cat_2
 runoff_cat_3
 runoff_cat_4
 runoff_cat_5
 runoff_cat_6
 runoff_cat_7
 runoff_cat_8
 runoff_cat_9
 pp_cat_0
 pp_cat_1
 pp_cat_2
 pp_cat_3
 pp_cat_4
 pp_cat_5
 pp_cat_6
```

```
  pp_cat_7
  pp_cat_8
  pp_cat_9
  ;; Catchment description
  total_patches
  total_imp
  pp_ratio
  pct_grass
  pct_privet
  pct_compacted
  pct_tarmac
  pct_sand
  pct_edge
  pct_road
  pct_sidewalk
  pct_walk_path
  pct_cycle_path
  pct_sport_area
  pct_car_park_imp
  pct_car_park
]

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;; functions calls by the bottoms ;;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to A_Setup ; Setup the catchment and the permeable pavement generation
  clear-all
  import_land_use
  import_mnt
  import_well
  set_color_land_use
  set_color_well
  set_description
end

to B_Startup ; Initialize the simulation
  clear-drawing
  clear-turtles
  clear-all-plots
  set_ground_properties
  initialized
  set_color_ground
  reset-ticks
end
```

```
to C_Go ; Function to run the model
 if rainfall = "extrem2"
 [rain_extrem2]
 if rainfall = "extrem1"
 [rain_extrem1]
 if rainfall = "major"
 [rain_major]
 if rainfall = "severe"
 [rain_severe]
 if rainfall = "occasional"
 [rain_occasional]
 if rainfall = "current"
 [rain_current]
 if rainfall = "light"
 [rain_light]
 if rainfall = "110615"
 [rain_110615]
 if rainfall = "120615"
 [rain_120615]
 run_permeable_pavement
 run_storage
 run_surface_processes
 run_runoff
 run_well
 run_evaporation
 set count_rain count_rain + rain
 set total_rain total_rain + rain * count patches with [pground != "privet" and pground != "edge"
and pground != "empty"]
 set total_interception sum [interception] of patches with [pground != "privet" and pground !=
"edge" and pground != "empty"]
 set total_runoff sum [runoff] of patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and
pground != "empty"]
 set total_infiltration sum [infiltration] of patches with [pground != "privet" and pground !=
"edge" and pground != "empty" and pground != "tarmac"]
 set total_pp_infiltration sum [pp_infiltration] of patches with [pground =
"permeable_pavement"]
 set total_well_infiltration sum [well_infiltration] of patches with [pwell = 2]
 set total_drain sum [pp_drain] of patches with [pground = "permeable_pavement"]
 set total_evaporation sum [evaporation] of patches with [pground != "privet" and pground !=
"edge" and pground != "empty"]
 set total_storage sum [pp_storage] of patches with [pground = "permeable_pavement"]
 set total_well_storage sum [well_storage] of patches with [pwell = 2]
 set total_sand_infiltration sum [infiltration] of patches with [pground = "sand"]
 set total_grass_infiltration sum [infiltration] of patches with [pground = "grass"]
 set total_compacted_infiltration sum [infiltration] of patches with [pground = "compacted"]
 set max_runoff max [runoff] of patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and
pground != "empty"]
```

```
  set runoff_cat_0 count patches with [runoff_cat = 0 and pground != "privet" and pground !=
"edge" and pground != "empty"]
  set runoff_cat_1 count patches with [runoff_cat = 1]
  set runoff_cat_2 count patches with [runoff_cat = 2]
  set runoff_cat_3 count patches with [runoff_cat = 3]
  set runoff_cat_4 count patches with [runoff_cat = 4]
  set runoff_cat_5 count patches with [runoff_cat = 5]
  set runoff_cat_6 count patches with [runoff_cat = 6]
  set runoff_cat_7 count patches with [runoff_cat = 7]
  set runoff_cat_8 count patches with [runoff_cat = 8]
  set runoff_cat_9 count patches with [runoff_cat = 9]
  set pp_cat_0 count patches with [pp_cat = 0 and pground = "permeable_pavement"]
  set pp_cat_1 count patches with [pp_cat = 1]
  set pp_cat_2 count patches with [pp_cat = 2]
  set pp_cat_3 count patches with [pp_cat = 3]
  set pp_cat_4 count patches with [pp_cat = 4]
  set pp_cat_5 count patches with [pp_cat = 5]
  set pp_cat_6 count patches with [pp_cat = 6]
  set pp_cat_7 count patches with [pp_cat = 7]
  set pp_cat_8 count patches with [pp_cat = 8]
  set pp_cat_9 count patches with [pp_cat = 9]
  set_color_ground
  set_color_runoff
  if (End? and Total_runoff = 0 and Total_interception = 0)
  [
    set time_end ticks
    stop
  ]
  if ticks > 186
  [
    stop
  ]
  tick
end

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;; functions to import a raster  file ;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to import_land_use ; function to set pground to an imported raster file
  set land_use gis:load-dataset "land_use_3_0.5.asc"
  gis:apply-raster land_use pland_use ; apply the land use type to the patches
  ask patches with [pland_use =  1 ] [ set pland_use "building"set pground "privet"]
  ask patches with [pland_use =  2 ] [ set pland_use "sidewalk" set pground "compacted"]
  ask patches with [pland_use =  3 ] [ set pland_use "sport_area"set pground "tarmac"]
  ask patches with [pland_use =  4 ] [ set pland_use "road"set pground "tarmac"]
  ask patches with [pland_use =  5 ] [ set pland_use "walk_path"set pground "tarmac"]
```

```
 ask patches with [pland_use =  6 ] [ set pland_use "beatch"set pground "sand"]
 ask patches with [pland_use =  7 ] [ set pland_use "cycle_path"set pground "tarmac"]
 ask patches with [pland_use =  8 ] [ set pland_use "car_park"set pground "compacted"]
 ask patches with [pland_use =  9 ] [ set pland_use "car_park_imp"set pground "tarmac"]
 ask patches with [pland_use =  10 ] [ set pland_use "garden"set pground "privet"]
 ask patches with [pland_use =  11 ] [ set pland_use "dune"set pground "grass"]
 ask patches with [pland_use =  12 ] [ set pland_use "empty"set pground "empty"]
 ask patches with [pland_use =  13 ] [ set pland_use "green_space"set pground "grass"]
 ask patches with [pland_use =  14 ] [ set pland_use "edge"set pground "edge"]
 ask patches with [pground = 0]
 [
  set pground "empty"
 ]
 repeat 5
 [
  ask patches with [pland_use = "building"]
  [
   if any? neighbors4 with [pground = "compacted"]
   [
    set pland_use "sidewalk"
    set pground "compacted"
   ]
  ]
 ]
 repeat 5
 [
  ask patches with [pland_use = "garden"]
  [
   if any? neighbors4 with [pground = "compacted" or pground = "tarmac"]
   [
    set pland_use "sidewalk"
    set pground "compacted"
   ]
  ]
 ]
end

to import_mnt ; function to set pzcor to a imported raster file
 set mnt gis:load-dataset "mnt.asc"
 gis:apply-raster mnt pmnt ; apply the mnt to the patches
 ;; Set a fixed elevation value for the patches outside the catchment.
 ;; This elevation is higher than the real one in order to avoid any runoff.
 ask patches
 [
  set pzcor 10000
 ]
 ;; Convert elevation in meter to elevation in mm
```

```
 ask patches with [pmnt > 0]
 [
  set pzcor pmnt * 1000
 ]
 ;; Artificialy increase the elevation of buildinds and egde
 ask patches with [pland_use = "edge" or pland_use = "building"] ; or pground = "privet"
 [
  set pzcor pzcor + 5000
 ]
 ;; If some patches include in the catchment don't have a mnt value. Give them the min elevation
of their neighbors
 ;; Correct some missing values in the beatch.
 repeat 10
 [
  ask patches with [pground != "empty" and pzcor = 10000]
  [
   set pzcor min [pzcor] of neighbors
  ]
 ]
 ;; Set min and max elevation in order to ajust the elevation visualisation
 set z_max max [pzcor] of patches ; actualized the value of z_max after the diffuse function
 set z_min min [pzcor] of patches ; actualized the value of z_city after the diffuse function
end

to import_well ; function to set the gullies
 set gullies gis:load-dataset "avaloir_t.asc"
 gis:apply-raster gullies pwell ; set the attributs pweel to 2
end

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;; functions to generate the permeable pavement ;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to set_permeable_pavement_manual
 if manual?
 [
 if mouse-down?
 [
  ask patch mouse-xcor mouse-ycor
  [
   ask patches in-radius (pp_size / 2) with [pground = "tarmac" or pground = "compacted"] ;
   [
    set pground "permeable_pavement"
    set pland_use "permeable_pavement"
    set pcolor violet
   ]
  ]
```

```
 ]
 ]
 set_ground_properties
 set pp_ratio (count patches with [pground = "permeable_pavement"] / count patches with
[pground = "tarmac" or pground = "compacted"])
end

to set_permeable_pavement_well
 ask patches with [pwell = 2]
 [
  ask patches in-radius (pp_size / 2) with [pground = "tarmac" or pground = "compacted"] ;
  [
   set pground "permeable_pavement"
   set pland_use "permeable_pavement"
   set pcolor violet
  ]
 ]
 set_ground_properties
 set pp_ratio (count patches with [pground = "permeable_pavement"] / count patches with
[pground = "tarmac" or pground = "compacted"])
end

to set_permeable_pavement
 ifelse manual?
 []
 [
  set pp_ratio (count patches with [pground = "permeable_pavement"] / count patches with
[pground = "tarmac" or pground = "compacted"])
  let function_localisation pp_function_localisation
  let run_while "yes"
  if pp_elevation_localisation = "no_rule"
  [
   while [pp_ratio < (pp_imp_ratio / 100) and run_while = "yes"]
   [
    ifelse any? patches with [pland_use = function_localisation]
    [
     ask one-of patches with [pland_use = function_localisation]
     [
      ask patches in-radius (pp_size / 2) with [pland_use = function_localisation] ;
      [
       set pground "permeable_pavement"
       set pland_use "permeable_pavement"
       set pcolor violet
       set pp_ratio (count patches with [pground = "permeable_pavement"] / count patches
with [pground = "tarmac" or pground = "compacted"])
      ]
     ]
```

```
      ]
      [
       set run_while "no"
       show "no more patches to convert, set a new function localisation"
      ]
     ]
    ]
    if pp_elevation_localisation = "top"
    [
     while [pp_ratio < (pp_imp_ratio / 100) and run_while = "yes"]
     [
      let pz_tarmac max [pzcor] of patches with [pland_use = function_localisation]
      ifelse any? patches with [pland_use = function_localisation]
      [
       ask one-of patches with [pland_use = function_localisation and pzcor = pz_tarmac]
       [
        ask patches in-radius (pp_size / 2) with [pland_use = function_localisation]  ;
        [
         set pground "permeable_pavement"
         set pland_use "permeable_pavement"
         set pcolor violet
         set pp_ratio (count patches with [pground = "permeable_pavement"] / count patches
with [pground = "tarmac" or pground = "compacted"])
        ]
       ]
      ]
      [
       set run_while "no"
       show "no more patches to convert, set a new function_localisation"
      ]
     ]
    ]
    if pp_elevation_localisation = "bottom"
    [
     while [pp_ratio < (pp_imp_ratio / 100) and run_while = "yes"]
     [
      let pz_tarmac min [pzcor] of patches with [pland_use = function_localisation]
      ifelse any? patches with [pland_use = function_localisation]
      [
       ask one-of patches with [pland_use = function_localisation and pzcor = pz_tarmac]
       [
        ask patches in-radius (pp_size / 2) with [pland_use = function_localisation]  ;
        [
         set pground "permeable_pavement"
         set pland_use "permeable_pavement"
         set pcolor violet
```

```
          set pp_ratio (count patches with [pground = "permeable_pavement"] / count patches
with [pground = "tarmac" or pground = "compacted"])
         ]
        ]
       ]
       [
        set run_while "no"
        show "no more patches to convert, set a new function_localisation"
       ]
     ]
   ]
 ]
end

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;; List of function to set properties and globals ;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to set_ground_properties
 ask patches
 [
  set p_interception 0
  set p_flow_in 0
  set p_storage 0
  set p_infiltration 0
  set p_well_storage 0
  set pzbottom pzcor
 ]
 ask patches with [pground = "tarmac"]
 [
  set p_interception tarmac_interception
 ]
 ask patches with [pground = "compacted"]
 [
  set p_interception gravel_interception
  set p_infiltration (soil_permeability / 50)
 ]
 ask patches with [pground = "grass"]
 [
  set p_interception grass_interception
  set p_infiltration soil_permeability
 ]
 ask patches with [pground = "sand"]
 [
  set p_interception sand_interception
  set p_infiltration soil_permeability
 ]
```

```
 ask patches with [pground = "sand_gravel"]
 [
  set p_interception sand_interception
  set p_infiltration (soil_permeability / 10)
 ]
 ask patches with [pground = "permeable_pavement"]
 [
  set p_flow_in pp_flow_in
  set p_storage pp_max_storage
  set p_interception pp_interception
  set p_infiltration soil_permeability
  set pzbottom (pzcor - 500)
 ]
 ask patches with [pwell = 2]
 [
  set p_well_storage (well_max_storage / 4) ;; On the map gullies are represented and their is in
average four gullies for one well
 ]
end

to initialized
 ask patches
 [
  set runoff 0
  set runoff_cat 0
  set interception 1
  set pp_storage 0
  set infiltration 0
  set pp_drain 0
  set evaporation 0
  set well_storage 0
  set well_infiltration 0
 ]
 set count_rain 0
 set total_rain 0
 set total_runoff 0
 set total_interception 0
 set total_storage 0
 set total_infiltration 0
 set total_pp_infiltration 0
 set total_well_infiltration 0
 set total_drain 0
 set total_evaporation 0
 set total_outflow 0
 set total_well_storage 0
 set rain 0
 if evaporation_type = "Summer"
```

```
  [
    set PET 0.004
  ]
  if evaporation_type = "Winter"
  [
    set PET 0.001
  ]
  set End? False
end

to set_description
  set total_patches count patches with [pground != "empty"]
  set total_imp count patches with [pground = "tarmac" or pground = "compacted"]

  set pct_grass count patches with [pground = "grass"] / total_patches * 100
  set pct_privet count patches with [pground = "privet"] / total_patches * 100
  set pct_compacted count patches with [pground = "compacted"] / total_patches * 100
  set pct_tarmac count patches with [pground = "tarmac"] / total_patches * 100
  set pct_sand count patches with [pground = "sand" or pground = "sand_gravel"] / total_patches
* 100
  set pct_edge count patches with [pground = "edge"] / total_patches * 100

  set pct_road count patches with [pland_use = "road"] / total_imp * 100
  set pct_sidewalk count patches with [pland_use = "sidewalk"] / total_imp * 100
  set pct_walk_path count patches with [pland_use = "walk_path"] / total_imp * 100
  set pct_cycle_path count patches with [pland_use = "cycle_path"] / total_imp * 100
  set pct_sport_area count patches with [pland_use = "sport_area"] / total_imp * 100
  set pct_car_park_imp count patches with [pland_use = "car_park_imp"] / total_imp * 100
  set pct_car_park count patches with [pland_use = "car_park"] / total_imp * 100
end

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;; Function to define rainfall events ;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to rain_extrem2
  if ticks < 5 [set rain 0]
  if ticks >= 5 and ticks < 35 [set rain 0.2]
  if ticks >= 35 and ticks < 65 [set rain 0.4]
  if ticks >= 65 and ticks < 95 [set rain 1.6]
  if ticks >= 95 and ticks < 125 [set rain 0.5]
  if ticks >= 125
  [
    set rain 0
    set End? True
  ]
end
```

```
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;; List of function to set color or shape ;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to set_color_mnt ; function to set color to patchs according to their elevation
 ask patches
 [
  set pcolor scale-color brown pzcor (z_max + 2000) (z_min - 1000) ; set color to the elevation
 ]
end

to set_color_runoff ; function to set color to patchs according to their runoff
 ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty" and
runoff > 0]
 [
  set pcolor scale-color blue runoff (200) (-20)
 ]
end

to set_color_runoff_cat ; function to set color to patchs according to their runoff caterory
 ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty" and
runoff > 0]
 [
  set pcolor scale-color blue runoff_cat (200) (-20)
 ]
end

to show_max_runoff
 ask max-one-of patches [runoff]
 [
  ask patches in-radius 1
  [
   set pcolor red
  ]
 ]
end

to set_color_ground ; function to set color to patchs according to their ground type
 ask patches [ set pcolor white]
 ask patches with [pground = "edge"] [ set pcolor  green - 2 ]
 ask patches with [pground = "grass"] [ set pcolor  green ]
 ask patches with [pground = "compacted"] [ set pcolor  brown ]
 ask patches with [pground = "privet"] [ set pcolor  green + 2 ]
 ask patches with [pground = "sand"] [ set pcolor  yellow ]
 ask patches with [pground = "sand_gravel"] [ set pcolor  yellow - 2  ]
 ask patches with [pground = "tarmac"] [ set pcolor  grey ]
```

```
 ask patches with [pground = "permeable_pavement"]
 [
  set pcolor violet
 ]
end

to set_color_land_use
 ask patches [ set pcolor white]
 ask patches with [pland_use = "beatch"] [ set pcolor  yellow ]
 ask patches with [pland_use = "building"] [ set pcolor  red ]
 ask patches with [pland_use = "car_park"] [ set pcolor  blue ]
 ask patches with [pland_use = "car_park_imp"] [ set pcolor  blue + 2  ]
 ask patches with [pland_use = "cycle_path"] [ set pcolor  brown + 2  ]
 ask patches with [pland_use = "dune"] [ set pcolor  yellow - 2  ]
 ask patches with [pland_use = "edge"] [ set pcolor  green - 2 ]
 ask patches with [pland_use = "garden"] [ set pcolor  green  ]
 ask patches with [pland_use = "green_space"] [ set pcolor  green + 2 ]
 ask patches with [pland_use = "road"] [ set pcolor  grey ]
 ask patches with [pland_use = "sidewalk"] [ set pcolor  grey + 2 ]
 ask patches with [pland_use = "sport_area"] [ set pcolor  grey - 2  ]
 ask patches with [pland_use = "walk_path"] [ set pcolor  brown ]
 ask patches with [pland_use = "permeable_pavement"]
 [
  set pcolor violet
 ]
end

to set_color_well ;; set the color of the patches with an infiltration well
 ask patches with [pwell = 2]
 [
  set pcolor pink
 ]
end

to set_drops_draw
 ifelse draw?
 [
  ask turtles [pen-down]
 ]
 [
  ask turtles [pen-up]
 ]
end
```

```
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;; functions to run the hydrological process ;;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to run_permeable_pavement
 ask patches with [pground = "permeable_pavement" and pp_storage > 0]
 [
  ifelse pp_storage > (p_infiltration)
  [
   set pp_infiltration pp_infiltration + (p_infiltration)
   set pp_storage pp_storage - (p_infiltration)
  ]
  [
   set pp_infiltration pp_infiltration + pp_storage
   set pp_storage 0
  ]
  ifelse Drain?
  [
   if pp_storage > p_storage
   [
    set pp_drain (pp_drain + pp_storage - p_storage)
    set pp_storage p_storage
   ]
  ]
  [
   if pp_storage > p_storage
   [
    set runoff (runoff + pp_storage - p_storage)
    set pp_storage p_storage
   ]
  ]
 ]
 ask patches with [pground = "permeable_pavement"]
 [
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage = 0
  [
   set pp_cat 0
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 10 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 0
  [
   set pp_cat 1
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 50 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 10
  [
   set pp_cat 2
```

```
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 100 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 50
  [
   set pp_cat 3
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 200 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 100
  [
   set pp_cat 4
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 300 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 200
  [
   set pp_cat 5
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 400 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 300
  [
   set pp_cat 6
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 500 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 400
  [
   set pp_cat 7
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage <= 1000 and
evaporation + infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 500
  [
   set pp_cat 8
  ]
  if evaporation + pp_infiltration + pp_drain + interception + pp_storage > 1000
  [
   set pp_cat 9
  ]
 ]
end

to run_storage
 ;; Waters generation
 ask patches with [pground = "permeable_pavement" and interception > 0]
 [
  if interception > p_interception
  [
   sprout-waters waters_nbr
   [
    set water_size ((interception - (p_interception)) / waters_nbr)
```

```
      set color blue - 4
      set size water_size
      set shape "drop"
     ]
     set interception (interception - sum [water_size] of waters-here)
   ]
  ]
  ;; Waters move
  foreach sort-on [water_size] waters
  [
  the-water -> ask the-water
  [
   ; get the lowest neighboring patch taking into account how much water is on each patch.
   let target min-one-of neighbors [pzbottom + (sum [water_size] of waters-here) + pp_storage]
   ; if the elevation of the bottom + water on the neighboring patch is lower than here move to
that patch.
   if [pzbottom + (sum [water_size] of waters-here) + pp_storage] of target < (pzbottom + (sum
[water_size] of waters-here) + pp_storage)
   [move-to target ]
  ]
  ]
  ;; Converte waters to storage
  ask patches with [any? waters-here]
  [
   set pp_storage pp_storage + sum [water_size] of waters-here
   ask waters-here [die]
  ]
  ;; Percolation from the bedding to the fundation
  ask patches with [pground = "permeable_pavement" and interception > 0]
  [
   if rain = 0
   [
    if interception > p_interception / 10
    [
     set interception (interception - p_infiltration / 10)
     set pp_storage (pp_storage + p_infiltration / 10)
    ]
   ]
  ]
end

to run_surface_processes
  ;; run inflow
  ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty"]
  [
   set runoff (runoff + rain)
  ]
```

```
 ;; run interception
 ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty" and
pground != "permeable_pavement" and runoff > 0 and interception < p_interception]
 [
  ifelse runoff > (p_interception - interception)
  [
   set runoff (runoff - (p_interception - interception))
   set interception p_interception
  ]
  [
   set interception (interception + runoff)
   set runoff 0
  ]
 ]
;; run infiltration
 ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty" and
pground != "permeable_pavement" and pground != "tarmac" and runoff > 0]
 [
  ifelse runoff > (p_infiltration)
  [
   set runoff (runoff - p_infiltration)
   set infiltration (infiltration + p_infiltration)
  ]
  [
   set infiltration (infiltration + runoff)
   set runoff 0
  ]
 ]
;; run flow_in
 ask patches with [pground = "permeable_pavement" and runoff > 0]
 [
  ifelse runoff > p_flow_in
  [
     set runoff (runoff - p_flow_in)
     set interception (interception + p_flow_in)
  ]
  [
     set interception (interception + runoff)
     set runoff 0
  ]
 ]
;; run outflow by wells
 if well?
 [
  ask patches with [pwell = 2]
  [
   ifelse runoff > (p_well_storage - well_storage)
```

```
    [
      set runoff (runoff - (p_well_storage - well_storage))
      set well_storage p_well_storage
    ]
    [
      set well_storage (well_storage + runoff)
      set runoff 0
    ]
  ]
 ]
end

to run_runoff
 ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty" and
runoff > 0]
 [
  sprout-drops drops_nbr
  [
   set drop_size (runoff / drops_nbr)
   set color blue
   set size drop_size
   set shape "circle"
  ]
  set runoff (runoff - sum [drop_size] of drops-here)
 ]
 set_drops_draw
 foreach sort-on [drop_size] drops
 [
 the-drop -> ask the-drop
 [
  ; get the lowest neighboring patch taking into account how much water is on each patch.
  let target min-one-of neighbors [pzcor + sum [drop_size] of drops-here + runoff]
  ; if the elevation + water on the neighboring patch is lower than here move to that patch.
  if [pzcor + sum [drop_size] of drops-here + runoff] of target < (pzcor + sum [drop_size] of
drops-here + runoff)
  [move-to target]
 ]
 ]
 ask patches with [any? drops-here and pground = "empty"]
 [
  set total_outflow (total_outflow + sum [drop_size] of drops-here)
  ask drops-here [die]
 ]
 ask patches with [any? drops-here]
 [
  set runoff runoff + sum [drop_size] of drops-here
  ask drops-here [die]
```

```
  if runoff = 0
  [
   set runoff_cat 0
  ]
  if runoff <= 10 and runoff > 0
  [
   set runoff_cat 1
  ]
  if runoff <= 50 and runoff > 10
  [
   set runoff_cat 2
  ]
  if runoff <= 100 and runoff > 50
  [
   set runoff_cat 3
  ]
  if runoff <= 200 and runoff > 100
  [
   set runoff_cat 4
  ]
  if runoff <= 300 and runoff > 200
  [
   set runoff_cat 5
  ]
  if runoff <= 400 and runoff > 300
  [
   set runoff_cat 6
  ]
  if runoff <= 500 and runoff > 400
  [
   set runoff_cat 7
  ]
  if runoff <= 1000 and runoff > 500
  [
   set runoff_cat 8
  ]
  if runoff > 1000
  [
   set runoff_cat 9
  ]
 ]
end

to run_well
 ;; Infiltration wells assume to allow infiltration only at the sides and not at the bottom.
 ;; Infiltration wells gravel porosity assume to 0.5
 ;; Infiltration wells have radius of 1 meter
```

```
 ask patches with [pwell = 2 and well_storage > 0]
 [
  ifelse well_storage > (2 * soil_permeability * (1 + (well_storage / 500 / 2))*(well_storage /
500) * 3.14)
  [
   set well_infiltration (well_infiltration + (2 * soil_permeability * (1 + (well_storage / 500 /
2))*(well_storage / 500) * 3.14))
   set well_storage (well_storage - (2 * soil_permeability * (1 + (well_storage / 500 /
2))*(well_storage / 500) * 3.14))
  ]
  [
   set well_infiltration (well_infiltration + well_storage)
   set well_storage 0
  ]
 ]
end

to run_evaporation
 ;; run evaporation
 if rain = 0
 [
  ask patches with [pground != "privet" and pground != "edge" and pground != "empty" and
interception > 0]
  [
   ifelse interception > PET
   [
    set evaporation evaporation + PET
    set interception interception - PET
   ]
   [
    set evaporation evaporation + interception
    set interception 0
   ]
  ]
 ]
end

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;;;;; Authors ;;;;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

; Olivier Cortier (ESITC Caen & LETG Caen)
```

RÉSUMÉ

Les revêtements perméables se développent en France et à l'étranger comme une technique d'avenir en réponse aux enjeux de la protection des sols et de l'amélioration du cycle de l'eau en milieu urbain. Le développement de pavés drainants au sein du laboratoire de l'ESITC Caen a mis en évidence le besoin de quantifier les apports des revêtements perméables pour répondre aux attentes des acteurs locaux et favoriser l'utilisation de ces techniques par les aménageurs. Dans ce but, ce travail de thèse porte sur la description des processus hydrologiques au sein des revêtements perméables et la quantification de leurs bénéfices sur le ruissellement urbain. Deux modèles ont été développés pour répondre à ces objectifs.Le premier permet de modéliser les processus hydrologiques au sein des structures perméables avec une approche physique basée sur la résolution de l'équation de RICHARDS par la méthode des éléments finis. Cette modélisation apporte des éléments de compréhension sur l'influence des propriétés de la structure et de son environnement sur ses performances. Elle a abouti à la proposition d'une représentation conceptuelle du comportement hydrologique des structures perméables. Le second modèle permet de modéliser le comportement hydrologique d'un bassin versant avec une approche par systèmes multi-agents. Différents scénarios d'implantation de revêtements perméables ont été simulés sur un site d'étude réel situé à Ouistreham en Normandie. L'exploration de ce modèle apporte des éléments de quantification des bénéfices de l'implantation des revêtements perméables sur le ruissellement de surface. Les résultats obtenus mettent en évidence le lien entre le ratio de surface perméable sur la surface imperméable et la réduction du ruissellement. Ils soulignent l'importance de la dispersion des zones de revêtements perméables pour optimiser leurs bénéfices.

MOTS CLEFS : Béton drainant, Contrôle à la source, FlexPDE, Modélisation à base physique, Netlogo, Revêtements perméables, Systèmes multi-agents, Ville poreuse.

ABSTRACT

Permeable pavements are developing in France and abroad as a promising response to the growing issues of ground protection and the improvement of the water cycle in urban areas. The development of pervious concrete within the laboratory of ESITC Caen had highlighted the need to quantify the contributions of the permeable pavement, and thus meeting the expectations of local authorities and encouraging the use of these techniques by urban planners. In this purpose, this Phd aims at describing the hydrological mechanisms of the permeable pavements and quantifying their benefits on surface runoff. Two models were developed to respond to these objectives. The first one allows modeling the hydrological processes inside permeable pavement structures with a physically-based approach, which solves RICHARD's law with a finite element method. This modeling enables the understanding of the influence of the properties of the structure and its environment on its performances. Results have led to the proposal of a conceptual representation of permeable structures. The second model allows modeling the hydrological behavior of an urban catchment with an agent-based approach. Various scenarios of permeable pavement implemantations were simulated on a real study site located at Ouistreham in Normandy. The analysis of this model enables the quantifying of the benefits of the implementation of permeable pavements on surface runoff. Results highlight the link between the permeable surface on the impermeable surface ratio and the reduction of runoff. They emphasize the importance of dispersing permeable pavement areas to maximize their benefits.

MOTS CLEFS : Agent-based modeling, FlexPDE, Netlogo, Permeable pavements, Pervious concrete, Physically-base modeling, Source control, Sponge City.